II. Physiologische und psychologische Grundlagen, Kolorimetrie, Farbübertragung.

Bearbeitet von Professor Dr. F. SCHRÖTER, Ulm a/D.

1a. Die physiologisch und psychologisch bedingten Bildeigenschaften.

Der eigentliche Empfänger des Fernsehbildes ist das menschliche Auge. Das technische Gerät, das die gesteuerten Lichteindrücke auf dem Beobachtungsschirm hervorbringt, ist nur der Vermittler der Sendung. Es muß sich den physiologischen Eigentümlichkeiten und Daten unseres Gesichtssinnes anpassen. Soll der Ersatz für wirkliches, direktes Sehen des Übertragungsgegenstandes an Ort und Stelle hochwertig sein, so sind vor allem zu fordern:

1. Eine Auflösung, die im ganzen Bildfeld der Sehschärfe des menschlichen Auges genügend nahekommt (als Maß der Auflösung dient die Zahl der Bildzeilen k);
2. volle Kontinuität im Leuchten des Fernbildes mit den Wirkungen a) der glatten Verschmelzung von Bewegungen, analog dem kinematographischen Effekt, b) der Flimmerfreiheit;
3. die nötige Anzahl von Kontraststufen von einem zum anderen Ende der Grauskala, d. h. vom tiefsten Schwarz bis zum hellsten Weiß (H_{min} und H_{max}, wo H die Helligkeit auf dem Empfangsschirm bedeutet);
4. gute Gradationswiedergabe, also verhältnisrichtige, über alles genommen dem „Gammawert“ 1 (s. S. 44) nahekommende Abbildung der im Originalbild gegebenen Helligkeitsverteilung;
5. ausreichende mittlere Helligkeit H_m (oder H) des Empfangsschirmes;
6. unverzerrte Übertragung der Koordinaten aller Bildpunkte, d. h. geometrisch getreue Reproduktion, innerhalb der Grenzen der okularen Wahrnehmbarkeit;
7. genügend großer Öffnungswinkel des Fernbildes.

Diese Anforderungen gelten ebenso für unfarbige wie für naturfarbige Fernsehübertragung. Bei der letzteren kommt als unerläßliche Bedingung hinzu:

8. verhältnisrichtige Wiedergabe der drei Grundfarbenanteile (meist Rot, Grün, Blau), also unverzerrte Übermittlung der entsprechenden Koordinatenwerte im Farbdreieck, sowie der Helligkeitsamplituden der Komponenten.

Zwischen den angegebenen Bildeigenschaften bestehen gegenseitige Abhängigkeiten, so daß diese Forderungen zum Teil nicht voneinander getrennt behandelt werden können. Dies gilt beispielsweise für das sehr wichtige, in der Frühzeit des Fernsehens zu wenig beachtete Problem des *Kontrastes*. Sehschärfe und Kontrast lassen sich nicht unabhängig voneinander definieren. Wo wir mit immer weitergehender Unterteilung des Bildfeldes einen Grenzwinkel erreichen, bei dem unser Gesichtssinn zwei benachbarte Flächenelemente nicht mehr als Zweiheit zu empfinden vermag, wo also, anders ausgedrückt, das Auflösungsvermögen endet, ist wesentlich bedingt durch den Helligkeitsunterschied, aber auch durch die absoluten Helligkeiten jener beiden Elemente. Kommen diese Helligkeiten der Schwelle der Sichtbarkeit nahe, wo die Quantenstruktur des Lichts eine Rolle zu spielen beginnt, so wird die Auflösung eine statistische Frage, ähnlich wie die Erkennbarkeit eines schwachen Signals im Rauschpegel eines Empfängers. Maß-

gebend für das Empfinden eines Kontrastes ist dann der Verhältniswert $\frac{H_1 - H_2}{\Delta H}$, wenn H_1 und H_2 die verglichenen Helligkeiten und ΔH die zeitliche Schwankung ihres Mittels bedeuten. Man sieht sofort, daß bei $H_1 - H_2 = \Delta H$ die Unterscheidbarkeit verschwindet, und hat daher zu untersuchen, wieviel mal $H_1 - H_2$ größer sein muß als ΔH, um gerade eben einen Kontrast wahrnehmen zu können.

Diese später fortzusetzende Betrachtung zeigt eine der bestehenden Verknüpfungen, deren Erforschung durch die heute schon dem Auge fast ebenbürtige Empfindlichkeit der neuesten Bildgeberröhren akut geworden ist. Eine andere wichtige Abhängigkeit physiologischer Art besteht zwischen der Flimmerfrequenzgrenze und der Leuchtdichte des Fernbildes, und beim farbigen Fernsehen treten als bestimmende Faktoren für den Grad des Flimmerns noch das Intensitätsverhältnis der drei Farbauszüge sowie der Bildwinkel hinzu (s. S. 71).

Da im Falle des farbigen Fernsehens die Verhältnisse kompliziert sind, werden wir zunächst die physiologischen Grundlagen der reinen Schwarz-Weiß-Übertragung erörtern und erst danach auf die spezifischen Fragen und Anforderungen der farbigen Reproduktion eingehen.

Man kann im Zweifel sein, ob die in der Einleitung dieses Kapitels S. 20 angeführte Bedingung unverzerrter Bildgeometrie eine funktionelle Vorschrift unseres Gesichtssinnes befriedigen soll oder ob sie lediglich ästhetischen Ursprung hat. Das Auge duldet um so größere Maßstab- und Lageverzerrungen im Fernbild, je weiter darin die verglichenen Teile auseinanderliegen und je weniger Anhaltspunkte das Bild an sich für solche Vergleiche bietet. Jedoch gilt dies nur, solange die betrachteten Zonen im Bildfeld ruhen. Ganz anders verhält es sich bei der Bewegung eines Objekts vor unbewegtem Hintergrund, zumal wenn es zufällig räumlich konstante Perioden der Helligkeit, also in gleichbleibenden Abständen wiederkehrende Markierungspunkte (Konturen, Unterbrechungen usw.) aufweist. Dann tritt die örtliche Schwankung der Geometrie bzw. ihrer sonst unbemerkt bleibenden Verzerrung deutlich in Erscheinung. Sie muß daher durch möglichst lineare Ablenkung des bildabtastenden wie des bildschreibenden Kathodenstrahls in sehr engen Grenzen gehalten werden.

Diese Betrachtung führt in ein Gebiet hinein, wo physiologische Erscheinungen mit *psychologischen* Reaktionen zusammenwirken. Die Unterscheidung der Helligkeiten benachbarter Flächen ist die Folge *gleichzeitiger* ungleicher Erregung der wirksamen Netzhautzapfen und der von diesen durch Fortleitung des Reizes beeinflußten Gehirnzellen. Hierbei werden Empfindungen nur registriert. Beim Verfolgen der Bildgeometrie eines bewegten Fernsehgegenstandes hingegen vergleichen wir *zeitlich getrennte* Zustände. Indem wir eine spätere Abbildung des Objekts mit einer früheren zur figürlichen Deckung oder mindestens in maßstäblichen Einklang zu bringen suchen, nehmen wir die Erinnerung in Anspruch, das assoziative Denken, das die aufeinanderfolgenden Einzelbeobachtungen einem und demselben Vorgang oder Ding zuordnet. Damit sind wir auf einem Gebiet der *Psychologie* angelangt, das mehr oder minder flüchtige Reize der Perzeptionsorgane in Beziehung setzt zu den durch Denkreflexe oder „psychische Kompensation" daraus abgeleiteten sinnlichen Wahrnehmungen, deren Stärke, zeitlicher Verlauf, Zusammenhang mit anderen Parametern u. a. m. als Funktion meßbarer physikalischer Variabeln darstellbar ist. Es würde den Rahmen des vorliegenden Buches überschreiten, dieses vielseitige, vorwiegend experimentell erschlossene Gebiet der Psychologie näher zu behandeln. Lediglich einige bei der Erfassung schnell veränderlichen Bildinhalts zweifellos beteiligte Eigenschaften des menschlichen Gesichtssinnes sollen besprochen werden, soweit sie sich in technischen Forderungen auswirken.

Auch das plastische Sehen, das durch den Augenabstand und die Neigung der Augenachsen gegeneinander zustande kommt, beruht auf einem psychologischen Kompensationseffekt, der die Nichtkongruenz der zum Gehirn übertragenen Lichtreize durch „Umdeutung" in das dreidimensional wahrgenommene Bild der Außenwelt aufhebt. Wir können das stereoskopische Phänomen unter Inkaufnahme zusätzlichen technischen Aufwandes im Fernsehen vollwertig nachahmen. Es scheint jedoch, daß die Reproduktion in natürlichen Farben allein schon dem Fernbild ein soweit gesteigertes Relief verleiht, daß dieses im Vergleich mit der monochromatischen Wiedergabe als ausreichend plastisch empfunden wird.

2a. Sehschärfe.

Die im gelben Fleck der Netzhaut des menschlichen Auges am dichtesten gelagerten Zapfen, die das Sehen in dem hier maßgebenden Helligkeitsbereich vermitteln, haben Durchmesser von $4 \cdots 5\,\mu$. Dadurch ist die Fläche des einzelnen okularen Empfangselements und zugleich die Grenze der Auflösungsmöglichkeit unabhängig von der Lichtstärke des auf der Netzhaut entworfenen Bildes als ein physiologischer Absolutwert des Individuums gegeben. Aus den geometrisch-optischen Daten des Auges berechnete H. SCHULZ [*1*] auf Grund der Annahme von $4\,\mu$ Zapfendurchmesser den kleinsten Winkel, den ein Objekt im Gesichtsfeld einnehmen kann, um noch einen unterscheidbaren Bildpunkt darzustellen, zu $50''$. Zahlreiche Messungen haben dieses Ergebnis bestätigt. Wie aber zu erwarten, handelt es sich um eine von Person zu Person veränderliche, nur in der Größenordnung konstante Grenze, die als „Sehschärfe" (des gesunden bzw. korrigierten Auges) bezeichnet wird. Inwieweit das so definierte Auflösungsvermögen ausgenutzt werden kann, hängt u. a. erheblich von der Beleuchtungsstärke der Netzhaut und von dem Kontrast im Bilde ab.

Etwas abweichend von obigem Wert gibt O. H. SCHADE [*3*] das Auflösungsvermögen des Auges an mit

$$\sin \alpha = 1{,}22\,\lambda/\delta\,,^*$$

wo α der Mindestwinkel ist, unter dem zwei Punkte erscheinen müssen, um sie getrennt wahrnehmen zu können; λ ist die Wellenlänge des Lichtes und δ der Pupillendurchmesser. Mit $\delta = 0{,}3$ cm, $\lambda = 5500$ ÅE wird $\alpha = 0{,}77'$. Bei einer Brennweite der Augenlinse von 15 mm liegen dann die beiden Punkte auf der Netzhaut 0,0033 mm auseinander, was also etwa der Größe der Zapfen in der Netzhautgrube (fovea centralis) entspricht. Für ein Verhältnis Betrachtungsabstand : Bildhöhe = 4 ergibt sich somit die Auflösungsschärfe der Augenoptik allein zu 2200 Zeilen; unter Berücksichtigung des mittleren Zapfendurchmessers sinkt dieser Wert auf etwa 1500 Zeilen, falls Aberration, Streuung und statistische Schwankungen vernachlässigt werden.

Nach Angaben von L. SCHNEIDER [*2*] waren bei verschiedenen Versuchspersonen für das Erreichen der Sehschärfe 1, die einem Auflösungsvermögen $\sphericalangle\,\alpha = 1'$ entspricht, sehr ungleiche, zwischen 2,5 Lux und 15 Lux schwankende Beleuchtungsstärken (E) erforderlich. In allen Fällen aber nahm die Sehschärfe mit wachsendem E deutlich zu, bis sie offenbar an die individuelle physiologische Grenze herangekommen war. Dabei wurde teilweise der von SCHULZ berechnete

---

* Bezüglich der Abhängigkeit des Winkels α von der Wellenlänge λ sei auf den Widerspruch aufmerksam gemacht, der zwischen der von SCHADE angegebenen Formel und neueren Messungen des RCA-Laboratoriums über die Sehschärfe im blauen Bereich des Spektrums besteht. Diese ergab sich als wesentlich geringer im Vergleich mit der in Rot und Grün. Siehe jedoch Kap. II. 9c.

Wert übertroffen, d. h. der Winkel 50″ unterschritten. Das ist bei der Unsicherheit der anatomischen Grundlagen und der Ungenauigkeit, die infolge subjektiver Einflüsse den meisten physiologischen Messungen anhaftet, nicht verwunderlich. Als eine unter den durchschnittlichen Verhältnissen des Fernsehens (Helligkeit des Empfangsbildschirmes, Rauschpegel, Zeilenstruktur) zutreffende Erfahrungszahl dürfen wir für die mindestnotwendige Auflösung $\alpha = 1{,}5'$ annehmen. Soweit hier von Ergebnissen berichtet ist, die auf abweichenden Werten von α beruhen, sind diese letzteren angegeben. Wie schon im Kap. I. 1a vorausgeschickt, hängt es wesentlich von dem Kontrastumfang ab, als wie „scharf" wir ein Bild empfinden. Es gibt also eine *photometrisch* bedingte Bildschärfe, die nur unter den günstigsten Helligkeits- und Gradationsverhältnissen gegen die *geometrische*, durch die Größe der Netzhautelemente bestimmte Bildschärfe (= Sehschärfe) konvergiert.

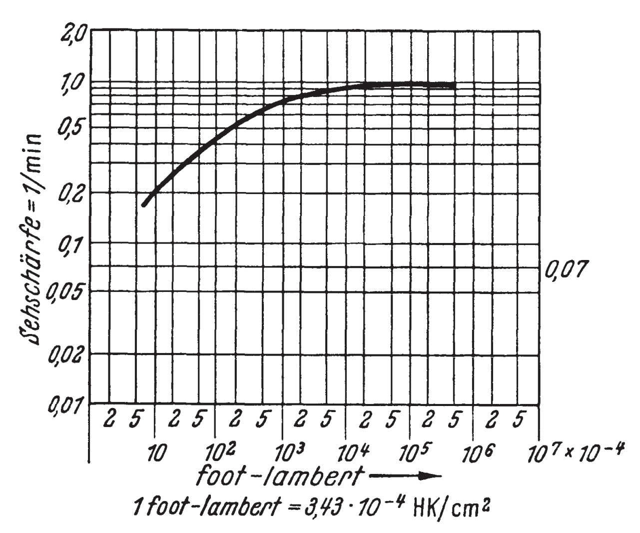


Abb. 2. Sehschärfe als Funktion der Adaptationsleuchtdichte nach P. C. GOLDMARK.

Eine Veranschaulichung dieser Tatsache gibt die von P. C. GOLDMARK veröffentlichte Kurve [4] nach Abb. 2. Die Sehschärfe ist hier als Reziprokwert von α, also in min^{-1}, in Abhängigkeit von der in foot-lambert gemessenen Beleuchtung aufgetragen, wobei die Bedingung innegehalten wurde: Beleuchtung des Testobjekts = Umfeldbeleuchtung. 1 foot-lambert = 3,43 NK/m². Das Testobjekt bestand aus einem feinen Gitter schwarzer Striche auf weißem Grund. Man erkennt, daß die Sehschärfe, von schwacher Beleuchtung beginnend, etwa bis zu 0,5 NK/m², erheblich zunimmt, darüber hinaus jedoch langsamer steigt. Selten überschreitet die Sehschärfe des normalen Auges bei guten Beleuchtungsstärken den Wert 0,5, entsprechend $\alpha = 2'$. Großes Abweichen von der Bedingung gleicher Beleuchtung des Betrachtungsgegenstandes und seiner Umrahmung verringert die Sehschärfe und setzt sie selbst bei hohen E merklich herab.

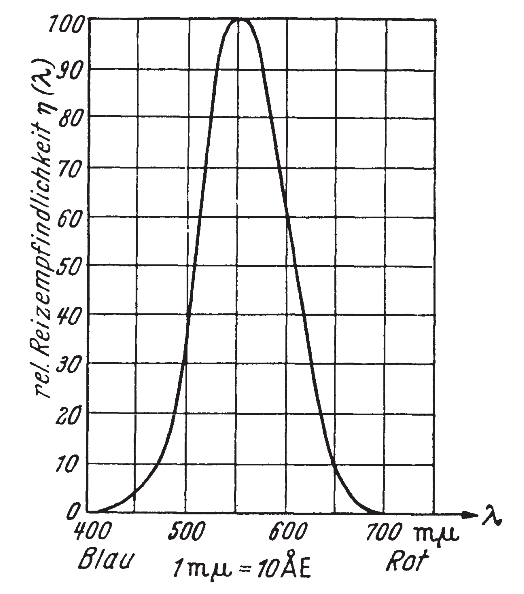


Abb. 3. Reizäquivalent der Leistungseinheit von sichtbarem Licht zwischen 400 mμ und 700 mμ; Maximum = 100 gesetzt.

2b. Augenempfindlichkeit.

In organischer Anpassung an die spektrale Energieverteilung der Sonnenstrahlung hat sich beim menschlichen Auge das Reizmaximum auf die Wellenlänge $\lambda = 5550$ ÅE (Gelbgrün) eingestellt. Abb. 3 gibt die Abhängigkeit der Helligkeitsempfindung $\eta(\lambda)$ von λ im gesamten Bereich der sichtbaren Strahlung, unter Voraussetzung gleicher Strahlungsleistung in sämtlichen Einzelabschnitten $\lambda + d\lambda$ des Spektrums[1],

[1] Man bezeichnet diesen Fall oft durch den Ausdruck „energiegleiches Spektrum", was zwar unmißverständlich, aber physikalisch nicht einwandfrei ist.

wieder. Diese Kurve ist auch für die Technik des naturfarbigen Fernsehens von Bedeutung; im Zusammenhang mit dem Erscheinungskomplex der Sehschärfe verdient sie hier deswegen Beachtung, weil unser okulares Auflösungsvermögen einen ähnlichen Verlauf zeigt, d. h. bezogen auf gleiche photometrische Helligkeit in der Gegend des Reizmaximums größer ist als beiderseits desselben. Die Auswirkung dieser Tatsache auf die Frequenzbandfrage des Dreifarben-Fernsehens wird uns im folgenden noch beschäftigen.

Stellen wir uns ein direkt auf dem Leuchtschirm der BRAUNschen Röhre beobachtetes schwarz-weißes Bildfeld vor, das 200 mm hoch, 260 mm breit und in 1000 Zeilen zerlegt ist. Die Breite der einzelnen Zeile beträgt dann 0,2 mm. Die vom Kathodenstrahl bei größter Bildhelligkeit mitgeführte Leistung sei 1 W (z. B. 100 μA maximale Strahlstromstärke bei 10000 V Beschleunigungsspannung). Unter den gedachten Verhältnissen liefert der Leistungsumsatz an der fluoreszierenden Schicht etwa 3,5 HK[1]. Das ergibt eine Leuchtdichte B von $6{,}7 \cdot 10^{-3}$ HK/cm² für die hellsten Lichter. Bei einem für gute Wiedergabe wünschenswerten (leider in der Regel nicht erreichbaren) Kontrastumfang 50:1 — der etwa dem des Kinobildes entspricht —, würde in den dunkelsten Schatten mit $B \cong 1{,}34 \cdot 10^{-4}$ HK/cm² zu rechnen sein. Nun hat H. LUX folgende Größenangaben über die Erkennbarkeit kleiner Sehzeichen in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke gemacht [*5*]:

Größe	Mindestleuchtdichte
0,2 mm	$1{,}44 \cdot 10^{-3}$ HK/cm²
0,3 mm	$0{,}45 \cdot 10^{-3}$ HK/cm²
0,4 mm	$0{,}23 \cdot 10^{-3}$ HK/cm²
0,8 mm	$0{,}027 \cdot 10^{-3}$ HK/cm²

Man erkennt, daß Einzelheiten, die der Seitenlänge des bei 1000 Bildzeilen und 200 mm Bildhöhe gegebenen Flächenelements entsprechen, in den hell belichteten Zonen gut, an den Stellen stärkerer Abdunklung aber nicht wahrnehmbar sein würden. Die Messungen von LUX fanden an ruhenden Objekten statt. Im bewegten Fernsehbild mit überlagertem Rauschpegel sind mit hoher Wahrscheinlichkeit für das Erkennen isolierter Zeichen der angegebenen Größen mehrfach gesteigerte Werte von B erforderlich: ein Grund unter vielen, die gegen zu weitgehendes Heraufsetzen der Zeilenzahl sprechen, solange die heute üblichen Maße und Beleuchtungsstärken der Empfangsschirme beibehalten werden müssen.

3a. Visionspersistenz, Verschmelzungsfrequenz, Flimmern.

Der stetige Eindruck des Fernsehbildes entsteht auf der Netzhaut des Auges durch verlangsamtes Abklingen der Licht*empfindung* nach Aufhören der Erregung. Objektiv ist nur der schnell bewegte, die Reihen der Flächenelemente periodisch aufhellende Schreiblichtpunkt vorhanden (wir beschränken uns grundsätzlich auf das normale Übertragungsverfahren und lassen hier Zellenraster- oder Speicherbilder außer Betracht). Durch die physiologische Nachwirkung wandelt sich das zeitliche Nacheinander der örtlich verteilten Lichtreize in das Nebeneinander scheinbar gleichzeitiger Helligkeitswerte um, deren Summe das Fernbild darstellt. Außerdem sorgt die Netzhautträgheit dafür, daß auf jedem einzelnen Flächenelement die für die Illusion kontinuierlicher Beleuchtung erforderliche Verschmelzung seiner bildfrequenten impulsartigen Aufhellungen eintritt. Mit

[1] Bei der angenommenen hohen Leistungs*dichte* im Strahl ist der Wirkungsgrad der benutzten Leuchtphosphore nicht mehr optimal. Der Schirm wird als rückseitig aluminisiert vorausgesetzt (Kap. X).

den quantitativen Gesetzen dieser Fähigkeiten unseres Gesichtssinnes müssen wir uns vertraut machen.

Jeder kennt die Erscheinung der „Visionspersistenz", die eine starke Beleuchtung der Netzhaut als abklingend fortbestehende Lichtwirkung hinterläßt. Dieses „Nachbild" währt bei mäßiger Reizung etwa 0,2 sek, bei heftiger Reizung minutenlang. Im Bereich der beim Fernsehen üblichen, vom Auge gemittelten Schirmhelligkeiten müssen deren Momentanwerte auf dem jeweils bestrahlten Flächenelement sehr hoch sein. Da aber die Dauer (t) des Aufleuchtens jedes Flächenelements äußerst kurz ist, bleibt die Visionspersistenz in solchen Grenzen, daß bei Verschiebungen der Schwarz-Weiß-Verteilung infolge von Bewegungen dort, wo z. B. im voraufgehenden Einzelbild, also $^1/_{25}$ sek vorher, maximale Intensität (H) wahrgenommen wurde, im nachfolgenden Einzelbild der Eindruck völliger Dunkelheit (Schwärze) entstehen kann, trotz der soeben erst unterbrochenen Aufhellung des betrachteten Elements. Diese Möglichkeit ist beim menschlichen Gesichtssinn innerhalb weiter Grenzen von H gegeben, weil unser Auge im Bereich so kurzer Einwirkungsdauern nicht auf Licht*ströme*, sondern auf Licht*mengen* (mittlerer Lichtstrom · Zeit) anspricht. Es gilt dann also das TALBOTsche Gesetz.

Nach TALBOT [*6*] empfindet unser Sehorgan bei kurzzeitigen Lichtreizen (deren Dauer Δt die Größenordnung der Visionspersistenz nicht überschreiten darf) eine Helligkeit proportional dem zeitlichen Mittelwert der Reizintensität J[1]. Ist J während dieses Δt konstant, so wird der Helligkeitseindruck:

$$H = K \cdot J \cdot \Delta t \qquad (K \text{ Konstante}). \tag{II.1}$$

Ändert sich J während des kleinen Zeitraumes Δt in Abhängigkeit von t, so gilt das TALBOTsche Integralgesetz:

$$H = K \cdot \int_0^{\Delta t} J(t)\, dt = K \cdot J_m \cdot \Delta t, \tag{II.2}$$

wo J_m den über Δt genommenen Mittelwert von $J(t)$ darstellt. Die Anwendung dieser wichtigen Beziehung beim Berechnen der Übertragungsschärfe von Hell-Dunkelkanten gehört in das Kap. III.

Da bei der normalen Bildfeldzerlegung die Dauer der Aufhellung des einzelnen Flächenelements äußerst kleine Werte Δt annimmt, — bei $\varrho = 450\,000$ Bildpunkten und 25 Einzelbildern/sek wird $\Delta t < 10^{-7}$ sek —, ist die Gl. (II.2) ohne Zweifel anwendbar. Über die ganze Periode des Einzelbildes, $^1/_{25}$ sek, erstreckt, liefert das TALBOTsche Integral die Verdünnung der Lichtdichte B des Schreiblichtpunktes im Verhältnis $\varrho : 1$. Im vorliegenden Falle ist $\varrho = 45 \cdot 10^4$, so daß die homogene Leuchtdichte B_r des Bildfeldes oder Zeilenrasters, das durch die Horizontal- und Vertikalablenkung des konstant aufgehellten Lichtpunktes erzeugt wird, den Wert hat:

$$B_r = \frac{B}{\varrho} = \frac{B}{45} \cdot 10^{-4} \qquad (\text{HK/cm}^2). \tag{II.3}$$

[1] Experimentelle Untersuchungen haben eine Art „Einschwingvorgang" der Netzhautreaktion geoffenbart. Ein zeitlich rechteckiger Lichtimpuls beginnt sich als Empfindung erst nach 0,01···0,02 sek auszuwirken, und ebenso groß ist die Verweilzeit der resultierenden Empfindungsstärke nach Aufhören des Impulses. Die „Anstiegsflanke" vom Beginn der Lichtempfindung bis zur vollen Stärke derselben hat eine Dauer von 0,1···0,2 sek. Man hat ferner das „Überschwingen", das Auftreten eines Maximums am Ende der Anstiegszeit, festgestellt, herrührend von peripheren Netzhautrezeptoren, die nur auf Lichtänderungen, nicht aber auf konstanten Reiz reagieren. Nach Erlöschen der Erregung beansprucht die „Abstiegsflanke" der Empfindung wiederum etwa 0,1···0,2 sek.

Diese Beziehung ist durch Messungen bestätigt worden. Für $f_b = 25\,\text{sek}^{-1}$ gilt also das Mittelwertgesetz noch exakt. Man muß es jedoch richtig deuten: Wir adaptieren zu diesem Zweck auf einen bestimmten Bildpunkt, der zur Zeit t_0 im Verlauf der normalen Fernsehübertragung $\left(\frac{1}{f_b \cdot \varrho}\text{ sek lang}\right)$ blitzartig beleuchtet wird. Zur Zeit $t_0 + \frac{1}{25}$ sek wird er erneut vom bildschreibenden Strahl überfahren. Dieser sei aber jetzt praktisch vollkommen ausgetastet. Wir stellten bereits auf S. 25 fest, daß der betrachtete Bildpunkt nun tatsächlich schwarz erscheint. Da die Natur keine Sprünge macht, wäre denkbar, daß die Mittelwertbildung nicht auf den Zeitraum von $\frac{1}{25}$ sek begrenzt sein kann und daher der Helligkeitseindruck, den die erste Erregung des Bildpunktes hervorrief, sich in das Zeitintervall seiner nächsten Übertragung, also in das folgende Einzelbild hinein, verlängern müßte. Das Ergebnis wäre eine Kontrastverminderung durch Aufhellung des Schwarzwertes. Wie kann man deren Nichtvorhandensein erklären bzw. welche Einflüsse überlagern sich dem Vorgang, den das TALBOTsche Gesetz mathematisch ausdrückt?

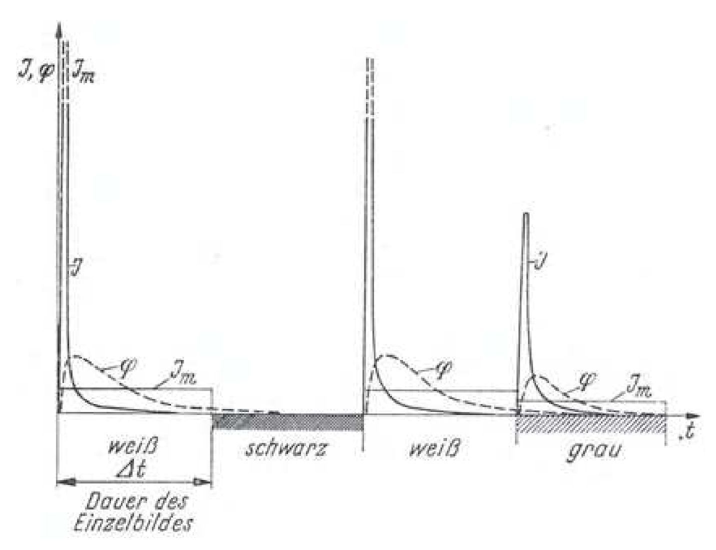


Abb. 4. Abklingen von Lichtreizstärke J und visueller Nachwirkung φ bei impulsartiger Erregung der Bildelemente.

Abb. 4 sucht zu veranschaulichen, wie die Erholung des Sehapparates sich der mittelwertbildenden Integration des Reizes (J) längs der Zeitachse (t) superponiert. Gefordert wird, daß der gleiche Bildpunkt nacheinander weiß, schwarz, weiß, grau erscheinen soll, und zwar jeweils $^1/_{25}$ sek lang. Die Ordinaten bedeuten: J kurzzeitiger Lichtreiz, J_m über die Dauer des Einzelbildes gemittelter Wert des Reizes im Sinne des Gesetzes Gl. (II.2), $\varphi = f(t)$ eine Zeitfunktion der Empfindung. Die unter den Impulsen J eingeschlossene Fläche ist nach Gl. (II.2) inhaltsgleich der Rechteckfläche $J_m \cdot \Delta t$. Dieser proportional steigt und fällt H. Das bedeutet nun aber nicht ein abruptes Verschwinden jener Größe, die J und H miteinander verknüpft, am Ende von $^1/_{25}$ sek. Vielmehr ist J_m nur ein Hilfsbegriff, der kein reales Phänomen beschreibt, sondern lediglich ein numerisches Äquivalent der wahren $J(t) \cdot t$-Fläche darstellt; er ist allerdings unentbehrlich für die Angabe einer anschaulichen quantitativen Beziehung zwischen J und H im Falle kurzdauernder einzelner oder periodischer Lichtreize. Was der Gesichtssinn tatsächlich empfindet, kann vermutlich am besten durch den Verlauf der Größe φ in Abb. 4 wiedergegeben werden. Er ist die Überlappung der zeitlichen Nachwirkung in den Perzeptionsorganen mit deren Erholung von der Reizbeanspruchung. Aus diesen beiden gegenläufigen Reaktionen resultiert eine Empfindung, deren Amplitude die Kurve $\varphi = f(t)$ beschreibt. Sie allein läßt die S. 29 behandelten Gesetze des Flimmerns verstehen.

Eine Stütze findet diese Erklärung in der Theorie des Flimmerphotometers, das zum Messen und Vergleichen von Lichtquellen, insbesondere solchen von verschiedener Farbe, dient.

Die visuelle Speicherzeit, d. h. diejenige Zeitdauer, über welche sich ein fortwirkender Lichteindruck als Empfindungsgröße akkumulieren kann, liegt, wie man aus Messungen an Fernsehschirmen weiß, bei 0,2 sek.

Nach H. E. Ives und E. T. Kingsbury [7] ist bei der Verschmelzung schnell wechselnder Beleuchtungen die Schwankungsamplitude der Empfindung S bedeutend kleiner als die Schwankungsamplitude des Netzhautreizes J (vgl. dazu Kap. II. 5a über Kontrastgesetze, insbesondere das Grundgesetz von Weber-Fechner). Sinkt das Verhältnis

$$\frac{S_{\max} - S_{\min}}{\overline{S}},$$

wo $\overline{S}$ die mittlere Empfindungsstärke bedeutet, unter einen Grenzwert, so hört das Flimmern auf. Wird J als Funktion der Belichtungsfrequenz f_v durch

$$J = J_0 (\cos \omega t + 1)$$

dargestellt, so daß $\omega = 2\pi f_v$ ist und J stets positiv bleibt, d. h. zwischen 0 und $2J_0$ pendelt, so resultiert bei Anwendung der Wärmeleitungstheorie[1] die Empfindungsstärke:

$$S = C \cdot J_0 [e^{-r_0 \sqrt{\omega}} \cdot \cos(\omega t - \eta) + 1] \tag{II.4}$$

(C Konstante, e Basis der natürlichen Logarithmen; die Phasenverschiebung η ist eine Funktion von r_0 und ω; r_0 ist wiederum von J_0 abhängig. Wir können diese Beziehungen hier außer acht lassen). Aus (II.4) folgt, da $\cos(\omega t - \eta)$ im Maximum $= +1$, im Minimum $= -1$:

$$\frac{S_{\max} - S_{\min}}{\overline{S}} = 2 e^{-r_0 \sqrt{\omega}}. \tag{II.5}$$

Mit wachsendem ω muß also bei konstantem J_0 und $\overline{S}$ der Zähler $S_{\max} - S_{\min}$, d. h. der Empfindungsunterschied, immer kleiner werden: Das Flimmern hört auf. Die Kurve φ in Abb. 4 bringt den Verlauf von $S \approx \varphi$ nach Gl. (II.4) angenähert zum Ausdruck, mindestens soweit es sich um den abklingenden Teil handelt (über den Mechanismus des Anklingens von S ist nichts Sicheres bekannt). Man entnimmt aus ihr, daß infolge Erholung der lichtempfindlichen Perzeptionsorgane bei „geeigneter" Frequenz, die eben die im Fernsehen angewandte Bildfrequenz f_b ist, ein heller Weißwert nach $1/_{25}$ sek auf dem gleichen Flächenelement von tiefem Schwarz gefolgt sein kann. Voraussetzung ist dabei nur, daß die Zeitkonstante des Abklingens der durch φ ausgedrückten Sinnesreaktion die richtige Größenordnung hat. Dies ist offenbar der Fall: In den USA. hat f_b in Anpassung an die Periodenzahl 60 Hz der Starkstromnetze den normalen Wert 30 Hz, statt 25 Hz in Europa. Trotz dieser Verkürzung der Wiederholungsperiode zeigen auch die amerikanischen Fernsehempfangsgeräte von Einzelbild zu Einzelbild voll ausgesteuerte Schwarz-Weiß-Wechsel der Flächenelemente.

Die erwähnte Abhängigkeit der Größe r_0 von der mittleren Reizintensität J_0 in Gl. (II.4) weist auf die wichtigste quantitative Gesetzmäßigkeit des Flimmerns bei periodischen Bildfolgen hin: r_0 hat die Dimension $1/\sqrt{\text{Frequenz}}$. Die wissen-

[1] Sind zwei Wechselgrößen durch einen trägheitsbehafteten Kopplungsvorgang miteinander verknüpft, so wird das Gesetz ihrer Beziehungen formal davon unabhängig sein, wie der verbindende Mechanismus im einzelnen beschaffen ist. Auf die vorliegende Frage angewandt, heißt dies: Es ist gleichgültig, ob die Trägheit, wie bei der mit gutem Grunde übernommenen Vorstellung einer Wärmeleitung, durch den Widerstand und die Kapazität des leitenden Mediums, durch Diffusion o. dgl. bedingt ist oder, wie im Falle des photochemischen Umsatzes auf der Netzhaut, durch die reversible Ausbleichreaktion des Sehpurpurs.

schaftliche Erforschung der Kinematographie hat ergeben, daß die Grenzfrequenz, bei der das vom Bildwechsel herrührende Helligkeitsflimmern in die Empfindung eines gleichmäßigen Leuchtens der Schirmfläche übergeht, dem Logarithmus der Beleuchtungsstärke E proportional ist. Wir betrachten hier, wohlbemerkt, nicht das Verhalten eines einzelnen Flächenelements, sondern das gesamte erhellte Bildfeld. Beim Kinofilm werden 24 Einzelbilder je sek durch das Projektionsfenster hindurchgeführt. Während diese Wechselzahl bei ruckartig bewegten Bildstreifen und Zwischenverdunklung voll ausreicht, um die dargestellten Bewegungen stroboskopisch zu verschmelzen, d. h. sie kontinuierlich erscheinen zu lassen, genügt sie nicht zur Unterdrückung des durch die Dunkelpausen verursachten Helligkeitsflimmerns, wenn E die mit den heutigen Projektionslichtquellen erhältlichen und aus Gründen verbesserten Kontrastes erwünschten Werte besitzt. Man hat daher die Bildfrequenz künstlich erhöht durch Einschalten einer rotierenden Sektorblende in den Strahlengang und ist so zu 48 und 72 Hell-Dunkel-Wechseln je sek gelangt.

3b. Überblendungsverfahren.

Bevor wir das Flimmern im Fernsehbild genauer analysieren, wollen wir als wichtig anmerken, daß im Vorstehenden *zwei* völlig verschiedene Erscheinungskomplexe berührt worden sind:

1. Die *stroboskopische Mindestfrequenz* der Bewegungsverschmelzung. Sie liegt bei normalen Übertragungsobjekten noch unter 24 Hz, und wird oft sogar mit 16 Hz angenommen. Bei sehr schnellen Verschiebungen im Bildfeld erscheint dieser Wert etwas zu niedrig, vor allem für farbiges Fernsehen. Da wir jedoch gewohnt sind, derartige Bewegungen auch in der direkten Sicht als optisch unscharf wahrzunehmen, läßt sich die Annahme von 16 Hz vertreten, wenn sie, wie wir sogleich sehen werden, technische Vorteile verspricht[1].

2. Die *Grenzfrequenz des Helligkeitsflimmerns* als Folge der periodischen Beleuchtung des Bildschirmes. Sie liegt bei annehmbaren Intensitäten erheblich höher als die stroboskopische Mindestfrequenz. Bei der heute üblichen Fernseh-Bildfeldzerlegung ist die Zahl der Einzelfelder je sek durch die Notwendigkeit der Beseitigung des Helligkeitsflimmerns gegeben. Dessen Grenzfrequenz ist in Gl. (I.1), S. 4 identisch mit dem Quotienten $1/T_f$ ($= 1/T_b$, falls das Zeilensprungverfahren nicht angewendet wird).

Die beiden unter 1. und 2. definierten kritischen Frequenzen nehmen Minimalwerte an im Falle des sogenannten *Überblendungs*bildes, das für Fernsehempfang bisher noch nicht in technisch brauchbarer Form verwirklicht werden konnte, wohl aber im Kinoprojektor von E. MECHAU einen überzeugenden Beweis seiner Leistungsfähigkeit erbracht hat. Durch einen rotierenden Kranz schwingender Spiegel wird bei *gleichförmig*, nicht ruckweise, bewegtem Filmband das Bild auf dem Projektionsschirm stillgehalten. Der Bildwechsel erfolgt durch stetiges Verdunkeln des voraufgehenden und stetiges Aufhellen des nachfolgenden Einzelbildes, das sich dabei dauernd mit seinem Vorgänger optisch deckt. Hier haben wir einen idealen Verschmelzungsmechanismus vor uns, der auch mit Erfolg für

---

[1] Im Kinobild erscheinen fahrende Rennwagen mit 250 km/h, falls sie nicht gerade im Vordergrund liegen, vollkommen „natürlich". Die Frequenz des Einzelbildes ist dabei 24 sek^{-1}. Nach Herabsetzen auf 16 Einzelbilder je sek würden entsprechende Objekte ebenso befriedigend wirken, wenn sie sich mit 167 km/h bewegten. Für Fernsehen in natürlichen Farben gilt diese Annahme nicht ohne weiteres mit Rücksicht auf die Entstehungsmöglichkeit von Farbsäumen an den Rändern des bewegten Gegenstandes; hier ist das Übertragungsverfahren maßgebend für die zulässige Geschwindigkeitsgrenze.

die Fernsehabtastung von Kinofilmen herangezogen worden ist [*8*]. In psychologischer Beziehung interessiert jedoch die mit dem MECHAU-Projektor gemachte Beobachtung, daß flimmerfreie Kinobilder noch bei einer Filmgeschwindigkeit von 12 Einzelbildern je sek möglich waren. Auch die Bewegungsverschmelzung ging dabei befriedigend vor sich [*9*]. Das Ergebnis ist durchaus einleuchtend: Die Flächenelemente des Überblendungsbildes erleiden keinen periodischen Durchgang durch die Intensität Null, sondern verharren in ihrer Helligkeit, bis sie durch den Wandel im wiedergegebenen Originalbild betroffen werden. In natürlichen Bildern ändert nur ein mäßiger Prozentsatz aller Flächenelemente binnen $^1/_{24}$ (oder $^1/_{25}$) sek seine Intensität, und die integrale *mittlere* Helligkeit des Bildfeldes schwankt dementsprechend langsam[1]. Der überwiegende Bruchteil der Flächenelemente behält seine Helligkeitsstufe während mehrerer Einzelbilder bei; soweit diese aber hier und da neu geregelt werden muß, geschieht es beim Überblenden ohne Zwischenverdunklung und absolut *stetig*. Die hierfür erforderliche Höchstfrequenz ist, wie leicht einzusehen, die stroboskopische Verschmelzungsfrequenz. Aber auch diese verringert sich im Vergleich mit der hergebrachten Bildwurfmethode, weil die Einzelphasen der Bewegung nicht „abgehackt" dargeboten werden, sondern die Verschiebung im Gesichtsfelde durch gleichzeitiges Verdunkeln der voraufgehenden und Aufhellen der nachfolgenden Lage des Objekts sozusagen kontinuierlich gemacht wird.

Das Ziel einer zukünftigen Fernsehtechnik ist daher die Schaffung eines Empfängers mit folgenden Eigenschaften:

1. Steuerung der Helligkeitswechsel durch Überblendung;
2. Frequenz dieser Steuerung = stroboskopische Verschmelzungsfrequenz des Überblendungsbildes.

Ein solches Empfangssystem würde durch Herabsetzung der Bildwechselzahl die Breite des Frequenzbandes im übertragenden elektrischen Kanal beträchtlich zu vermindern gestatten. Die notwendige *Speicherung* der Bildpunkthelligkeiten böte zugleich die Möglichkeit erheblicher Intensitätssteigerung auf dem Fernbildschirm, da sämtliche Flächenelemente *gleichzeitig* flimmerfrei leuchten. In der Verwirklichung des Speicherprinzips, das seinerzeit die Bildsendetechnik revolutioniert hat, auf der Empfangsseite liegt die logische Vollendung der Fernsehentwicklung [*10*]. Näheres darüber in Kap. X und im 2. Teilband.

3c. Sektorverhältnis.

Im Gegensatz zum Überblendungsbild besteht bei dem periodisch, während des Weiterrückens, abgedeckten Kinobild, ebenso wie beim Flimmerphotometer, ein sogenanntes *Sektorverhältnis*[2], der Quotient α = Hellzeit : Gesamtbildzeit. Die letztere ist also die Summe von Hell- und Dunkelzeit. Dadurch werden die physiologischen Verhältnisse komplizierter, als etwa bei sinusförmig veränderlichem Wechsellicht. E. S. FERRY und T. C. PORTER [*11, 11a*] haben für die Beziehung zwischen der Grenzfrequenz des Flimmerns f_v und der Beleuchtungsstärke E des Beobachtungsfeldes im Flimmerphotometer folgende einfache Gleichung gefunden:

$$f_v = a \cdot \log E + b, \tag{II.6}$$

[1] Ein Bericht, der von guter Wiedergabe bei nur 8 Einzelbildern je sek spricht, erscheint nicht genügend verbürgt.

[2] Der Ausdruck rührt her von der rotierenden Sektorblende, die bei gewissen Flimmerphotometern sowie zwecks Flimmerbeseitigung im Strahlengang der Kinoprojektion Anwendung findet.

wo a und b von α abhängige Konstanten bedeuten, die bei geringen Helligkeiten außerdem noch Funktionen der spektralen Wellenlänge sind. Die Untersuchungen PORTERS bezweckten den Nachweis der Gültigkeit des TALBOTschen Gesetzes für alle Teile des sichtbaren Spektrums und bestätigten experimentell die Zunahme von f_v mit dem Logarithmus von E. Die Konstanten a und b haben die in Abb. 5 angegebenen Werte; sie sind dort als $f(\alpha)$ eingetragen, mit konstantem E als Parameter. Bei normalen Leuchtdichten und $\alpha = 0{,}5$ ist a etwa gleich 10; daraus folgt, daß f_v bei Verzehnfachung von E um 10 Hz zunimmt. In den USA., wo mit Rücksicht auf die Frequenz 60 Hz der Starkstromnetze 60 Felder = 30 volle Bilder je sek für Fernsehen mit Zeilensprung normalisiert sind, bietet der Unterschied gegenüber der analogen europäischen Norm von 50 Feldern = 25 vollen Bildern je sek bereits einen fühlbaren Vorteil: die Lichtstärke des Empfangsbildfeldes kann vergleichsweise wesentlich größer eingestellt werden, ohne daß ein Flimmern bemerkbar wird. Da die zentralen Teile der Netzhaut des Auges weniger flimmerempfindlich sind als die peripheren, hängt f_v auch vom Gesichtswinkel der beleuchteten Zone ab, worauf wir später zurückkommen.

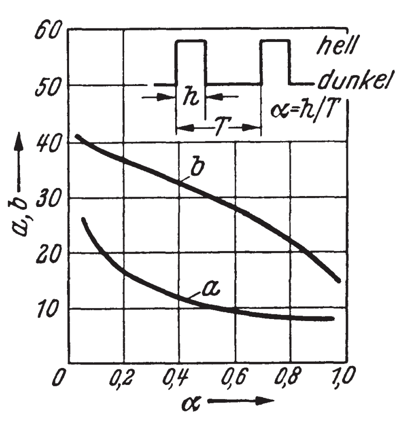


Abb. 5. Abhängigkeit der Größen a und b des Gesetzes von FERRY-PORTER vom Sektorverhältnis α = Hellzeit : Gesamtbildzeit.

Geht man von der Feldfrequenz $f_f = 50$ Hz aus, so ergibt sich aus Gl. (II.6) für die Grenzleuchtdichte, unterhalb deren kein Flimmern wahrnehmbar ist:

$$\log E_{\mathrm{gr}} = \frac{50 - b}{a}. \tag{II.7}$$

Die Konstanten a und b müssen also möglichst kleine Werte annehmen, wenn man recht helle Bilder flimmerfrei wiedergeben will. Da nun nach Abb. 5 a und b wachsen, je mehr sich das Sektorverhältnis α von 1 nach niedrigeren Werten hin entfernt, ist beim Fernsehen mit seinem Extremverhältnis $\alpha \ll 1$ anzustreben, durch Anwendung künstlicher Hilfsmittel α im entgegengesetzten Sinne zu verschieben, d. h. den Anteil der Hellzeit an der Gesamtbildzeit zu vergrößern. Ein solches Mittel ist das Schirmnachleuchten (s. S. 34).

Unter den Verhältnissen der Kinematographie [*12*] fällt f_v, in Abhängigkeit von E_{gr}, von $f_v = 38\ \mathrm{sek}^{-1}$ bei $E_{\mathrm{gr}} = 10$ Lux auf $f_v = 10\ \mathrm{sek}^{-1}$ bei $E_{\mathrm{gr}} = 1$ Lux. Genauere Messungen, auch mit höheren Werten von E_{gr}, liegen seitens H. E. IVES vor [*13*].

Freilich entsteht das Fernsehbild auf ganz andere Weise als in der Kinematographie, wo der Schirm nach jedem Bildwechsel als Ganzes beleuchtet wird. Indem der schnell bewegte, intensive Schreiblichtpunkt die Zeilen einzeln nacheinander durchläuft, erzeugt er im Auge einen blendend hellen, horizontalen Streifen, der sich durch das dunkle Blickfeld periodisch stets in dem gleichen Richtungssinn senkrecht zur Zeile (von oben nach unten)verschiebt. Momentan ist immer nur ein einziges Bildelement belichtet, die Aneinanderreihung der aufgehellten Elemente längs der Zeile erfolgt jedoch zu rasch, als daß man sie mit dem Auge erfassen könnte. In bezug auf Gl. (II.6) würde diese normale Form der Bildfeldzerlegung ein sehr kleines Sektorverhältnis α, also eine hohe Grenzfrequenz des Flimmerns bedeuten. Weil aber der Aufbau des Zeilenstapels von einer unwillkürlichen Akkommodationstendenz des Auges begleitet wird, fragt es sich, ob die übliche Definition des Sektorverhältnisses unter diesen Umständen noch einen Sinn hat. Zwar gelten die physiologischen Gesetze der Kine-

matographie in mancher Hinsicht überraschend gut, ja sogar quantitativ für das Fernsehbild; indessen dürfen wir die Grundverschiedenheit nicht außer acht lassen, die in der Erzeugung des Rasters durch ein über die Netzhaut hinwegwanderndes Leuchtband extremer Helligkeit besteht. Das Auge sucht unwillkürlich dieser Verschiebung zu folgen, indem es sich auf die jeweils hellste Zone des Bildfeldes einstellt. Bei 25 Feldern/sek gelingt ihm das auch insoweit, daß der Eindruck des *Flackerns* resultiert. Diese Bezeichnung erscheint dem Verfasser treffender als das Wort „Flimmern", das aber, weil bereits eingebürgert, beibehalten werden soll. Das englische, ins Französische übernommene „flicker" wird der Art des Phänomens eher gerecht. Ein solches Bild wirkt äußerst ermüdend. Steigert man aber bei unveränderter Beleuchtungsstärke die Frequenz der vertikalen Durchquerung des Gesichtsfeldes auf 50 sek^{-1} oder darüber hinaus, so kommt die Bewegungsakkommodation nicht mehr mit, das Mitgehen des okularen Muskelapparates setzt aus, und es ergibt sich die Empfindung einer stetigen, gleichmäßigen Erhellung des Bildschirmes. Eine Analogie zum Verhalten des Sehmechanismusses gegenüber dem Kinobild liegt dabei insofern vor, als naturgemäß jedes beteiligte Netzhautelement eine ausreichende Frequenz seiner periodischen Reizung erfordert. Dies allein würde jedoch nicht erklären, warum wir in dem Flimmern eine deutlich gerichtete Bewegung wahrnehmen, die bei horizontaler Zeilenlage vertikal, bei vertikaler Zeilenlage dagegen horizontal und stets so orientiert ist, daß das Flackern sich gleichsinnig mit der Zerlegung fortpflanzt. Eine zweite Stütze findet diese Auffassung in dem später zu besprechenden Mitnahmephänomen der Zeilensprungmethode, einem häufig gegen sie geltend gemachten Übelstand.

Andererseits beruht der große *Vorteil* des Zeilensprunges, als *Integraleffekt über die Bildfläche* gesehen, ebenfalls auf der Unmöglichkeit genügend rascher Akkommodationsbewegung des Auges. Die Darbietung von 50 Feldern/sek zwingt dem Betrachter die Illusion der Übertragung des Bildinhalts mit der Wiederholungsfrequenz 50 Hz auf und verhindert das Zustandekommen des Flimmereffektes; solange die Schirmhelligkeit in gewissen Grenzen bleibt.

3d. Grenzfrequenz des Flimmerns.

Abb. 6, die der Arbeit von O. H. SCHADE (RCA) [*14*] über die elektrisch-optischen Einflußfaktoren des Fernsehens entstammt, zeigt die Abhängigkeit der Grenzfrequenz f_K des Flimmerns, d. h. derjenigen Frequenz, bei deren Unterschreitung das Flimmern merklich wird, von der Leuchtdichte des Bildfeldes einer BRAUNschen Röhre, bezogen auf weißes Licht und verschiedene Abklingzeiten der benutzten Schirmphosphore. Sehr ausgeprägt tritt in dieser Kurvenschar der Einfluß der Nachleuchtdauer t hervor (Änderung des Sektorverhältnisses!); t ist bestimmt durch den für viele Fluoreszenzstoffe charakteristischen, mehr oder minder exponentiellen Abfall, und zwar wurde dessen Dauer auf den Zeitpunkt festgelegt, bei dem die Intensität auf 5% abgesunken war. Die Anregung des Phosphors durch den Kathodenstrahl kann dabei stets als ein Rechteckimpuls angenommen werden. Die ideale Mindestfrequenz des Bildwechsels wäre erreicht, wenn das Nachleuchten des Fluoreszenzschirmes künstlich so beeinflußt werden könnte, daß das S. 29 erörterte Sektorverhältnis α der Kinematographie auf einen Wert ~ 1 anwüchse. Der Phosphor müßte also nach Aufhören des Elektronenbeschusses zunächst intensiv weiterleuchten und dann kurz vor Ablauf von $^1/_{25}$ sek plötzlich erlöschen, wobei jedoch die durch Abb. 4 erörterte physiologische Nachwirkung zu berücksichtigen bliebe. Zur Zeit ist kein zu solchem Verhalten führender Weg erkennbar, und es besteht größere Wahrschein-

lichkeit dafür, daß die Lösung der Flimmerfreiheit bei kleinstmöglicher Bildfrequenz durch Speicherung der Steuerung und Überblendung nach S. 29 gefunden werden wird.

Für die in den USA. normierte Feldfrequenz 60 Hz liegt gemäß Abb. 6 die kritische Leuchtdichte bei $4{,}5 \cdots 100 \cdot 3{,}43 \cdot 10^{-4}$ NK/cm², entsprechend 48 bis 1078 Lux Beleuchtungsstärke[1]. Dieser Wert würde sich für die europäische Norm, je nach der Abklingcharakteristik des benutzten Leuchtstoffes, auf $^1/_8 \cdots ^1/_{11}$ erniedrigen. Jedoch gelten die von SCHADE veröffentlichten Daten nur für ein einheitlich aufgehelltes, nicht bildmäßig intensitätsmoduliertes Zeilenfeld. Verkleinern sich bei der Wiedergabe eines Bildes die hellen Teilbezirke des Rasters, so verringert sich auch der Gesichtswinkel, den diese Stellen einnehmen. Da die kritische Beleuchtungsstärke E bei konstanter Feldfrequenz mit abnehmendem Gesichtswinkel wächst, so verträgt das Auge verhältnismäßig starke, weit über 100 Lux ansteigende Maximalaufhellungen in begrenzten Bildbezirken sogar bei der Feldfrequenz 50 Hz.

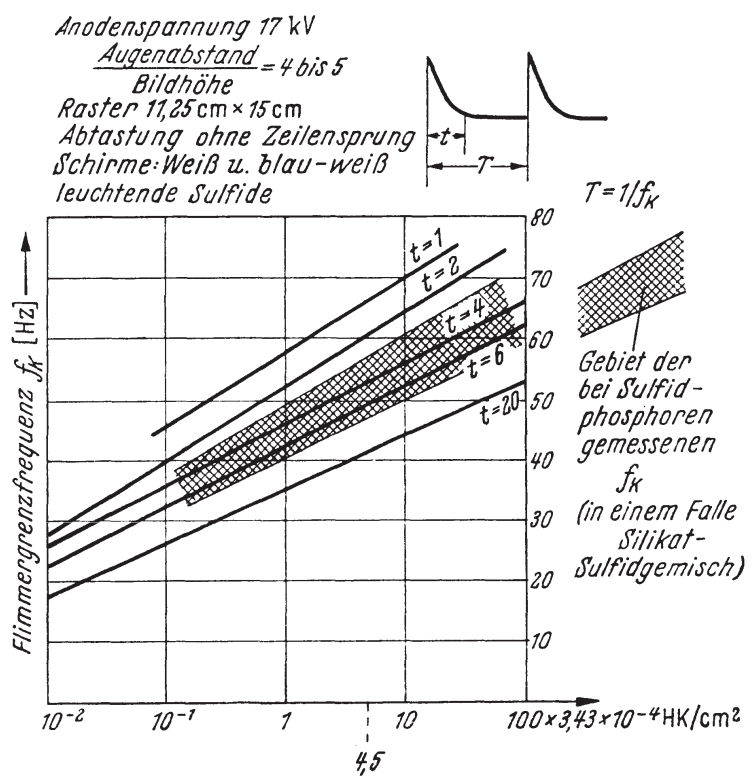


Abb. 6. Flimmerfrequenz als Funktion der Leuchtdichte (Abklingzeit t in Millisekunden für Abfallen der Leuchtdichte auf 5% des Anfangswertes). Nach O. H. SCHADE, RCA II. [3].

Die Messungen von SCHADE an unmodulierten, kontinuierlichen Zeilenrastern sind, sowohl was den Einfluß der Nachleucht-Zeitkonstanten, als auch was die Abhängigkeit der Flimmergrenzfrequenz vom Bildwinkel betrifft, von J. HAANTJES und F. W. DE VRIJER [15] durch statistische Untersuchungen (10 Beobachter) an normalen Fernsehbildern qualitativ bestätigt worden. Die Verfasser haben einen wichtigen Beitrag zu der durch die Angaben von SCHADE akut gewordenen Frage geliefert, für welche Schirmhelligkeiten 50 Felder/sek, der europäische Normwert, ausreichend sind, d. h. noch gerade die Frequenzschwelle überschreiten, unterhalb deren das Flimmern augenfällig wird. In Kino- und Fernsehbildern mit normaler Hell-Dunkel-Verteilung beträgt das Verhältnis der maximalen zur mittleren Helligkeit bzw. Leuchtdichte durchschnittlich 5 : 1. Es hat sich nun bei den Untersuchungen von HAANTJES und DE VRIJER ergeben, daß man die maximale Leuchtdichte im Vergleich zu dem bei unmoduliertem Zeilenfeld zulässigen Grenzwert verfünffachen darf, ohne störendes Flimmern wahrzu-

[1] Eine mit 1 Lux beleuchtete, verlustlos reflektierende Schirmfläche, deren Rückstrahlung dem LAMBERTschen Cosinus-Gesetz gehorcht, erscheint dem Betrachter als mit $\frac{1}{\pi} \cdot 10^{-4}$ NK/cm² = 0,093 foot-lambert selbstleuchtend. Um also auf einer solchen Fläche den Eindruck der Leuchtdichte 10^{-4} NK/cm² hervorzurufen, sind π Lux Beleuchtungsstärke erforderlich; die Leuchtdichte 1 foot-lambert entspräche dann 10,76 Lux. Die Verlustlosigkeit der Reflexion ist bei der Umrechnung der oben erwähnten Daten ebenfalls zugrunde gelegt.

nehmen. Die genannten Autoren stellten zunächst fest, daß bei $f_f = 60$ Hz die maximale Helligkeit eines Sulfidleuchtschirmes (kurze Abklingdauer) im Mittel 4,2mal, die eines Silikatleuchtschirmes (lange Abklingsdauer) 5,5mal so groß sein darf als unter gleichen Bedingungen bei $f_f = 50$ Hz. Im Anschluß daran wurde bei diesen beiden Frequenzen der Einfluß der Abklingdauer in normalen Fernsehbildern, bei verschiedenen Werten des Bildwinkels (definiert durch $\varrho =$ Betrachtungsabstand : Bildhöhe) geprüft und die Grenzleuchtdichte in foot-lambert ermittelt, oberhalb deren in den Lichtern das Auge durch Flimmern belästigt wird. Im Hinblick auf die Frage der europäischen Normung sind folgende Befunde zu erwähnen. Es wurden untersucht bei $f_f = 50$ Hz:

a) ein Sulfidleuchtschirm mit 0,1 msek Abklingdauer. Die Grenzleuchtdichte stieg von 12 foot-lambert bei $\varrho = 6$ auf 30 foot-lambert bei $\varrho = 14$. Diesen Werten entsprechen 129 Lux bzw. 323 Lux, also ein Mehrfaches von den bei unmoduliertem Blickfeld zulässigen Beleuchtungsstärken.

b) ein Willemitschirm mit 13 msek Abklingdauer, wobei dem Leuchtstoff zur Erzielung von weißem Licht ein blau emittierender, schnell abklingender Phosphor hinzugesetzt war. Die Grenzleuchtdichte betrug 56 foot-lambert bei $\varrho = 6$ und 136 foot-lambert bei $\varrho = 14$. Die zugehörigen Beleuchtungsstärken (stets für absorptionsfreien, ideal diffus strahlenden Schirm berechnet) waren 604 Lux und 1466 Lux.

Die praktische Schlußfolgerung ist, daß die europäische Normung von 25 Bildern/sek = 50 Feldern/sek völlig ausreichende maximale Schirmleuchtdichten ohne störendes Flimmern gewährleistet, solange normale Bilder übertragen werden. Filmtitel u. dgl. „leere" Bildfelder könnte man statt mit hellweißem mit leicht grauem Hintergrund senden[1].

Bei dem unter b) erwähnten Mischphosphor entstanden durch die Verschiedenheit der Abklingdauer beider Komponenten Farbumschläge an den Rändern bewegter Objekte. Man müßte also auf gleiche Nachleucht-Zeitkonstanten der Bestandteile hinarbeiten, dabei aber die Grenze beachten, die bei zu langsamem Abfall durch Nachbilder gegeben ist.

Nach H. Hertwig [*16*] sind bei $f_f = 50$ bis zu 300 Lux flimmerfrei möglich; doch berücksichtigt diese Angabe nicht die Abhängigkeit vom Gesichtswinkel der Bildfläche. Sie weist auch nicht, im Gegensatz zu den Messungen von Schade, Haantjes und de Vrijer, auf den starken Einfluß der Nachleucht-Zeitkonstante des Schirmes hin. Eigene Erfahrungen des Verfassers bestätigen jedoch den Verlauf des von Hertwig dargestellten funktionalen Zusammenhanges zwischen f_f und E (Zahl der Lux) für kleine Flächen.

Auf die oben angedeutete Beziehung zwischen dem Gesichtswinkel und der kritischen Flimmerfrequenz sowie auf den Zusammenhang zwischen dem Auflösungsvermögen des Auges und der Wahrnehmbarkeit von Flimmern in Grenzbezirken der okularen Trennbarkeit können wir näher erst in den folgenden Parag aphen eingehen. Diese Fragen haben als physiologische Grundlagen der Zeilensprung- und der neuen Punktraster-Verflechtungsmethode („dot-interlaced") erhebliche Bedeutung für die Entwicklung der Fernsehübertragung erlangt.

4a. Zwischenzeilenflimmern, Zeilenwandern.

Beim Zeilensprungbild macht sich, indem jedes der beiden ineinandergeflochtenen Zeilenraster für sich mit der Frequenz 25 Hz (in den USA. mit 30 Hz)

[1] Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß die beim Vergrößern von f_b auf den Wert 30 sek^{-1} mögliche, sehr erhebliche Erweiterung des Helligkeitsumfanges auf dem Fernbildschirm einen entsprechend gesteigerten Objektumfang (s. Kap. II. 6a) und eine bedeutende Vermehrung der Stufenzahl in der Kontrastskala (s. Kap. II. 5a) erlauben würde. Die Schärfe der Wiedergabe von Hell-Dunkel-Kanten wäre aus dem gleichen Grunde verbessert, weil ein Intensitätssprung von größerer Steilheit ausgenutzt werden könnte.

flimmert, das *Zeilensprung-* oder *Zwischenzeilenflimmern* störend bemerkbar. Während nach II. 3c in einer Entfernung vom Bildschirm, die auf Grund der Sehschärfengrenze hinreicht, um eine deutliche Auflösung, also Trennung beider Zeilenraster im Auge, unmöglich zu machen, ein Zustand 50periodischen Aufleuchtens und demnach völliger Flimmerfreiheit vorhanden zu sein scheint, erweckt das Bild bei größerer Annäherung den Eindruck, als ob die Zone stärkerer Aufhellung um eine Zeilenbreite mit sichtbarem Flimmern auf- und abwärts spränge. Bevor es durch die S. 33 erörterte Anwendung von Leuchtphosphoren mit günstiger Abklingkurve des Nachleuchtens (s. a. Kap. VI) gelang, das störende Phänomen des Zwischenzeilenflimmerns merklich zu reduzieren[1], verhinderte dieses die volle Ausnutzung des Zeilensprunges, indem es den Betrachter des Empfangsschirmes veranlaßte, einen solchen Abstand zu wählen, daß der Sehwinkel der einzelnen Zeile unter 1,5′ sank. Eine quantitative Untersuchung dieser Verhältnisse mittels einer das Ineinanderflechten zweier Zeilenraster nachbildenden beleuchteten Scheibe, die mit der die richtige Feldfrequenz ergebenden Drehzahl umlief, führte G. Weiss [*17*] durch. Er prüfte mit dieser Anordnung zugleich das Ansprechen von 10 Versuchspersonen auf eine zweite, dem Zeilensprungverfahren eigentümliche Bildstörung, das „*Zeilenwandern*". Man bezeichnet damit das Einfallen des Auges auf die halbe Zeilenzahl bei Bewegungen im Bildfeld die quer zur Zeilenrichtung erfolgen, einen Effekt, der mehr noch als das Zwischenzeilenflimmern zur Vergrößerung des Betrachtungsabstandes nötigt. Die mit der rotierenden Scheibe gewonnenen Ergebnisse wurden kontrolliert durch Beobachtung eines den wirklichen Verhältnissen entsprechenden Zeilensprungrasters auf dem Leuchtschirm einer Braunschen Röhre. Gemessen wurden:

1. Die Entfernung vom Schirm bzw. von der Scheibe, die zur vollen Auflösung des Rasters durch das Auge ausreichte;

2. die für das Verschwinden des Zwischenzeilenflimmerns erforderliche Vergrößerung dieser nach 1. gefundenen Entfernung;

3. der Betrachtungsabstand, bei dem das Störphänomen einer scheinbaren Halbierung der Zeilenzahl — auch Grobrasterstruktur genannt — aufhört. Die Ergebnisse s. S. 35[2].

Zuvor bedarf die von Weiss als Zeilenwandern bezeichnete Erscheinung einer näheren Erklärung: Sie hat nichts zu tun mit der hin und wieder beobachteten, auf Mängeln der Schaltung beruhenden „Paarigkeit" der beiden ineinander verflochtenen Zeilenraster, die von einem Phasenfehler des Einsatzes herrührt, wenngleich es klar ist, daß das Zeilensprungverfahren die Möglichkeit des Sichtbarwerdens eines derartigen Fehlers in der Relativlage der Zeilenbahnen überhaupt erst schafft. Es handelt sich vielmehr um folgendes: Angenommen, das Bild bestehe aus 625 Zeilen, also 2 Halbrastern zu je 625/2 Zeilen. Zur Zeit $t = 0$ akkommodiere das Auge beim Betrachten des Schirmes aus geringer Entfernung

---

[1] Die Bedeutung des Schirmnachleuchtens der Bildschreibröhre ist in jüngster Zeit beim Entwickeln der Methode des „dot-interlaced" (s. Kap. IV) für Schwarz-Weiß-Bilder deutlicher hervorgetreten. In dem DRP. Nr. 574085 hat der Verfasser bereits im Jahre 1930 die Anwendung des Zeilensprungverfahrens auf Kathodenstrahlröhren in Verbindung mit der Benutzung wirksam *nachleuchtender* Phosphore unter Schutz gestellt. Aber erst vor kurzem ist die Wichtigkeit der Nachleucht-Zeitkonstante durch erfolgreiches Abschwächen des Punktflimmerns bei Dot-Interlaced-Verfahren mittels der neuen Silikatphosphore mit verlängerter Abklingdauer augenfälliger geoffenbart worden.

[2] Die Versuche bezogen sich auf die damals erwogene Festsetzung von 441 Zeilen und bezweckten die Ermittlung der für ein Frequenzband von 2 MHz günstigsten Zerlegungsmethode. Schon früher hatte E. W. Engström [*18*] das gleiche Verfahren benutzt, um das Zwischenzeilenflimmern zu untersuchen.

auf eine bestimmte Zeile. An diese angrenzend und daher noch im Akkommodationsbereich liegend erscheint bei $t_1 = {}^1/_{50}$ sek die dem anderen Halbraster angehörende Nachbarzeile, auf die sich jetzt unwillkürlich die Einstellung konzentriert, weil die vorher aufgefaßte Zeile praktisch schon verdunkelt ist. Dadurch ist dem Mitgehen des Sehapparats bereits eine der beiden möglichen Richtungen gewiesen, und das Weitere entwickelt sich von selbst: Nach ${}^2/_{50}$ sek leuchtet die räumlich anschließende, dem ersten Halbraster zugeordnete Folgezeile auf, nach ${}^3/_{50}$ sek deren dem zweiten Halbraster angehöriger Nachbar usw. Die Akkommodierung springt so, begünstigt durch das Abklingen der Helligkeit der Vorgängerin, von einer Zeile zur nächsten, im Tempo 1 Zeile je ${}^1/_{50}$ sek. Dem Auge scheint daher das ganze Zeilensystem langsam senkrecht nach unten (oder nach oben, dies bleibt dem Zufall überlassen) zu wandern, nämlich in ${}^{625}/_{25} = 12{,}5$ sek einmal über die ganze Bildhöhe hinweg. Dieser Effekt ist freilich nur aus geringer Entfernung vom Bildschirm sichtbar. Er beweist die S. 31 zur Erklärung des Zerlegungsflimmerns herangezogene Akkommodationstendenz.

Wenn wir uns nun in den normalen Betrachtungsabstand begeben und ein Übertragungsobjekt vorstellen, das sich quer zur Zeilenrichtung mit der soeben berechneten Geschwindigkeit bewegt, so durchmißt seine Abbildung in ${}^1/_{50}$ sek wieder die Breite zweier Zeilen. Einzelheiten dieses Gegenstandes, die sich bei der Übertragung des geradzeiligen Halbrasters in den Zeilenbahnen des ungeradzahligen befinden und umgekehrt, werden nicht abgetastet und daher auch nicht wiedergegeben. Sie liegen mit Bezug auf den Zeilensprung dauernd in falscher Phase. Hingegen werden die um 1 Zeilenbreite dagegen versetzten Einzelheiten in jedem der beiden Halbraster erfaßt und erscheinen daher deutlich im Fernbild. Das Ergebnis ist das Einfallen des Auges auf die halbe Zeilenzahl, da nur die in jede zweite Zeile des Gegenstandes fallenden Bildelemente übertragen werden.

Mit diesen physiologisch-psychologischen Störerscheinungen kann ein stärker auffallendes Flimmern („Detail Flicker", s. O. H. SCHADE, [3] S. 277) einhergehen. Eine lange schwarze Horizontallinie, die parallel zur Zeilenrichtung ruhend auf hellem Grunde steht und die Breite der Zeilenbahn oder weniger hat, wird (vgl. S. 271) in der Übertragung als mehr oder minder dunkler Strich wiedergegeben, je nach ihrer Lage relativ zu beiden Halbrastern. Fällt die gedachte Linie bei der Abtastung nur in das eine derselben, so erscheint sie auf dem Empfangsschirm von zwei stark kontrastierenden, hellen Zeilen eingefaßt. Diese beiden Nachbarn leuchten mit der Frequenz $f_b = 25$/sek (bzw. 30/sek) auf und flimmern daher deutlich. Ist die dunkle Linie nur kurz, so schwindet die Erscheinung, da die angrenzenden Teile der Zeile aufgehellt sind und in ihnen das Verhalten eines normalen Zeilensprungrasters, einschließlich Zwischenzeilenflimmern, herrscht. Hinzu kommt in günstigem Sinne das Kleinerwerden des Bildwinkels der dunklen Strecke.

Abb. 7a gibt die Meßresultate von WEISS wieder. In Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke des Schirmes in Hefner-Lux (HK/m^2) sind die zur Unsichtbarmachung des Zeilenflimmerns und des Zeilenwanderns i. M. notwendigen Abstände in % derjenigen Entfernung angegeben, die gerade eben die Auflösung der vollen Zeilenzahl gestattet. Während bei 25 Bildern/sek = 50 Feldern/sek das Zeilenflimmern unterhalb etwa 18 Lux keine Vergrößerung des Betrachtungsabstandes erfordert, also kein Verlust an Bildschärfe in Kauf genommen werden müßte, bedingt das Zeilenwandern auch bei dieser reduzierten Helligkeit eine weitere Entfernung (bei der BRAUNschen Röhre, die damals noch keinen aluminisierten Leuchtschirm besaß, kamen Aufladungen des Leuchtphosphors als Ursache zusätzlicher Unsicherheit der Zeilenlage verschlimmernd hinzu). Erhöhung

der Bildwechselzahl, also von f_b und f_f, wirkt sich gemäß Abb. 7b aus, die für 160 Hefner-Lux Beleuchtungsstärke gilt. Das Zeilenflimmern macht bei $f_f \gg 55$Hz kein zusätzliches Abrücken vom Schirm notwendig, wohl aber das in weiten Grenzen von f_f unabhängige Zeilenwandern. WEISS schließt nun wie folgt: Da die erzwungene Vergrößerung des Betrachtungsabstandes zu partieller Verschmelzung zweier Nachbarzeilen führen muß, die geschriebene Zeilenzahl somit nicht mehr voll aufgelöst wird, d. h. die Bildschärfe entsprechend der Entfernungszunahme sinkt — und zwar nach *beiden* Koordinaten des Flächenelements —

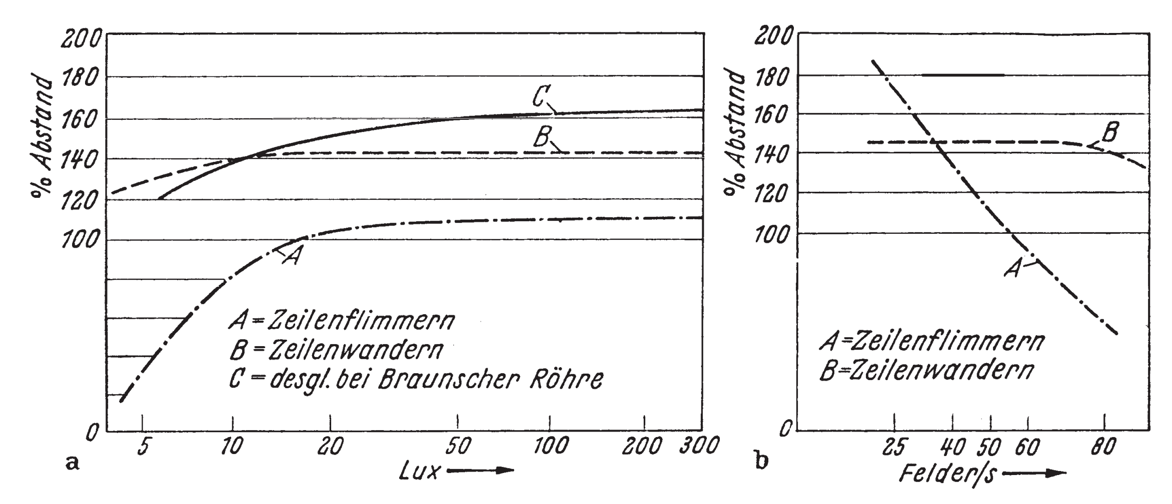


Abb. 7a. Störerscheinungen bei Zeilensprungabtastung. Notwendige Vergrößerung des Betrachtungsabstandes als Funktion der Beleuchtungsstärke. Nach G. WEISS, II. [17].

Abb. 7b. Störerscheinungen bei Zeilensprungabtastung. Notwendige Vergrößerung des Betrachtungsabstandes als Funktion der Feldfrequenz. Nach G. WEISS, II. [17].

kann man das übertragene Frequenzband Δf ohne Einbuße an Bildgüte im Verhältnis $\frac{1}{1{,}6} = 0{,}63$ verschmälern, wobei 1,6 die erforderliche, von WEISS gemessene Abstandsvergrößerung bedeutet. Umgekehrt wird bei gegebenem Δf eine höhere Zeilenzahl k möglich sein, als sie ohne den Faktor 0,63 herauskäme, wenn man für die Bildwechselfrequenz f_b und das Format F (Verhältnis Breite zu Höhe des Bildes) — ohne Berücksichtigung der Rücklaufzeiten des Kathodenstrahls — bestimmte feste Werte ansetzt. Nach WEISS ergibt sich dann:

$$k = \sqrt{\frac{2\,\Delta f}{f_b \cdot F \cdot 0{,}63}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 2 \cdot 10^6}{25 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}63}} = 460 \text{ Zeilen} \qquad \text{(II.8)}$$

unter Annahme von $\Delta f = 2$ MHz $= 2 \cdot 10^6$ Hz, $f_b = 25$ Hz, $F = 1{,}2$. Die Zahl der das Bildfeld aufbauenden kleinsten quadratischen Mosaikelemente ist beim Zeilensprungverfahren gemäß dem Vorstehenden

$$A = 0{,}63 \cdot \frac{2\,\Delta f}{f_b}\,. \qquad \text{(II.9)}$$

Mit $\Delta f = 2$MHz liefert dies bei $f_b = 25\,\text{sek}^{-1}$, also $f_f = 50\,\text{sek}^{-1}$:

$$A = 0{,}63 \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^6}{25} \simeq 100\,000 \text{ Elemente},$$

während eine Abtastung mit $f_b = f_f = 50$ voll übertragenen Bildern/sek, also ohne Zeilensprung und frei von den betrachteten physiologischen Störungen, den Wert

$$B = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^6}{50} = 80\,000 \text{ Elemente}$$

ergäbe. Das Zeilensprungverfahren ist also trotz der erzwungenen Abstandsvergrößerung hinsichtlich der Bildschärfe um 25% überlegen, wenn man vom ungünstigen Einfluß des bei konstanten Schirmabmessungen durch die weitere Entfernung des Beobachters bedingten kleineren Bildwinkels absieht. Die Zulässigkeit dieser Außerachtlassung beginnt bei Zeilenzahlen und entsprechenden Bildhöhen, die bei dem durch die vorstehenden Untersuchungen gegebenen Betrachtungsabstand bereits in das optimale Gebiet fallende Bildwinkel liefern (vgl. II. 7a).

4b. Punktverflechtung.

Die Ergebnisse der WEISSschen Messungen gelten, da als Bezugswert die Grenzentfernung der Auflösung des Zeilenrasters durch das Auge eingeführt ist, unabhängig von der Zahl k der Bildzeilen. Diese Tatsache hat den Vorschlag gezeitigt, den Vorteil der Teilraster, nämlich ein *als Ganzes* flimmerfreies Bildfeld ohne Erweiterung des der Bildfrequenz $f_b = 25$ (bzw. 30) Hz entsprechenden Modulationsspektrums, auf einem Wege zu erzielen, der das Zeilenwandern ausschließt [*19, 19a*]: Die Vortäuschung von 50 (bzw. 60) Bildwechseln/sek kann hiernach statt durch Auslassen jeder zweiten Zeile im Teilraster auch durch Überspringen jedes zweiten Bildpunktes *längs der Zeile* wie folgt bewirkt werden: Im 1. Feld werden in Zeile 1 nur die Bildpunkte 1, 3, 5 . . . $(2x - 1)$, in Zeile 2 nur die Bildpunkte 2, 4, 6 . . . $(2x)$, in Zeile 3 wiederum nur die Bildpunkte 1, 3, 5 . . . $(2x - 1)$ übertragen usf. Im 2. Feld hingegen erfolgt die Ausfüllung der Lücken nach dem Schema: Zeile 1, Bildpunkte 2, 4, 6 . . . $(2x)$; Zeile 2, Bildpunkte 1, 3, 5 . . . $(2x - 1)$; Zeile 3, Bildpunkte 2, 4, 6 . . . $(2x)$ usf. Es ergibt sich so ein schachbrettartiges Zerlegungsschema, in dem schwarz und weiß ihre Plätze von Teilraster zu Teilraster vertauschen, wenn die weißen Schachbrettfelder jeweils den übertragenen, die schwarzen den übersprungenen, ausgelassenen Bildpunkten entsprechen. Die synchronisierte Steuerung dieser Zerlegung erfordert eine treppenförmige Zeilenablenkkurve und ein bestimmtes numerisches Verhältnis der Zeilenfrequenz zur Frequenz des Rasterwechsels, Aufgaben, deren Lösung die Technik des Farbfernsehens gefunden hat (s. Kap. IV und Teilband 2).

Die beschriebene Punktverflechtung kann mit dem Zeilensprungverfahren vereint werden; dies ist bei der farbigen Übertragung ein Mittel zur Begrenzung des Frequenzbandes, aber nicht unbedenklich vom physiologischen Standpunkt aus und in jedem Falle nur in Verbindung mit sehr langsam abklingendem Leuchtstoff vertretbar[1].

Für die Punktverflechtung an sich gilt, daß bei ihr die Vorteile des Zeilensprunges, flimmerfreies Gesamtbild und unverbreitertes Frequenzband, grundsätzlich ebenso bestehen. Da in jedem Einzelfelde sämtliche Zeilen übertragen werden, ist das Einfallen des Auges auf die halbe Zeilenzahl (Grobzeilenrasterstruktur) ausgeschlossen. Hingegen liegen nunmehr folgende physiologische Störungsmöglichkeiten vor: 1. Punktflimmern, dadurch bedingt, daß zwei schachbrettartig ineinandergreifende Punktraster gegenphasig mit der Frequenz 25 Hz (bzw. 30 Hz) aufleuchten; 2. Körnigkeit des Bildes bei bestimmten Bewegungen durch Ausfallen des falschphasigen Punktrasters. Zum Unterschied von den Erscheinungen beim Zeilensprung beschränkt sich der unter 1. erwähnte Stör-

[1] Der Vorschlag, für Schwarz-Weiß-Bilder gleichzeitig die Punktverflechtung und die Zeilensprungzerlegung anzuwenden und dadurch für Europa f_b auf 12,5 Hz herabzusetzen, wurde dem Verfasser im Jahre 1950 von Herrn Professor Dr. W. NESTEL mitgeteilt und rührt von Dr. F. BELOW her.

effekt auf Gruppen von je 4 Flächenelementen, zwischen denen die Akkommodationstendenz des Auges gemäß Abb. 8 *geschlossen* verläuft. In a und b sind durch quadratische Felder je 4 benachbarte Bildpunkte dargestellt. Die Pfeile deuten die Umlaufbewegung des Aufleuchtens an, wobei die diagonalen Strecken so rasch durchmessen werden, daß man in a) die Punkte *1* und *3* und nach $^1/_{50}$ sek die Punkte *2* und *4* gleichzeitig sieht, da ja in jeder derartigen Gruppe die Aufhellung dauernd im Rhythmus der Feldfrequenz zwischen *1,3* und *2,4* wechselt. In diagonaler Richtung ist also kein Flimmern möglich. In vertikaler und horizontaler Richtung, vgl. b, c, erfordern jedoch die Übergänge $^1/_{50}$ sek. Bis das Aufleuchten eines und desselben Punktes wiederkehrt, verfließt daher $^1/_{25}$ sek, und es kann tatsächlich infolge des Hin- und Herwanderns Flimmern eintreten. Abb. 8c zeigt aber, daß von dem erhellten Punkt der Helligkeitswechsel ***horizontal und vertikal*** ausgeht, und zwar praktisch gleichzeitig. Der Akkommodationstendenz wird also, wie die Pfeile zeigen, keine eindeutige Richtung gewiesen. Sorgt man dafür, daß die Verlagerungen des Aufleuchtens nach Abb. 8c durch Nachleuchten möglichst gut überdeckt werden (Zeitkonstante $\approx 10^{-2}$ sek), so besteht die Möglichkeit, näher an den Bildschirm heranzugehen, als bei gleichem k und f_{max} im Falle des Zeilensprunges, und die scheinbare Bildschärfe nimmt zu.

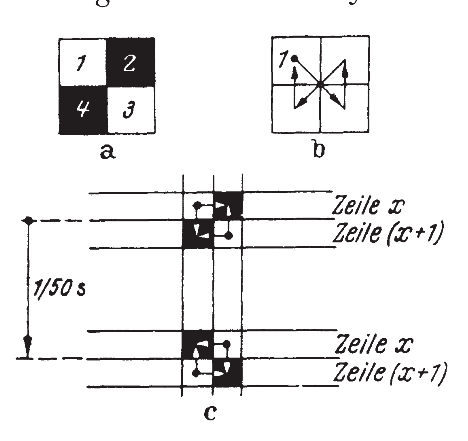


Abb. 8. Eigentümlichkeiten des Punktverflechtungsverfahrens (Umlaufsinn eines Punktzyklus während 1 Bildperiode).

Auf die Flimmererscheinungen des farbigen Fernsehbildes wird in Kap. II. 9d eingegangen. Ferner bleibt zu sagen, daß die in den folgenden Abschnitten des vorliegenden Kapitels dargestellten physiologisch-psychologischen Grundelemente zum Teil nur im Zusammenhang mit den Gesetzen der Bildfeldzerlegung sinnvoll behandelt werden können und insoweit nach Kap. III bis V hinübergenommen bzw. dort nochmals ergänzend besprochen werden müssen.

So z. B. werden wir später bei der Erwähnung des „Dot-Interlaced", das für die Farbübertragung wichtig, aber auch für Schwarz-Weiß-Bilder anwendbar erscheint, auf eine störende visuelle Begleiterscheinung zurückkommen, den „Crawl"-Effekt, den man, wie das Zwischenzeilenflimmern, durch Leuchtphosphore mit großer Abklingdauer zu verdecken bemüht ist. Dabei muß beachtet werden, daß zu langes Nachleuchten den Kontrast und die Bildschärfe beeinträchtigt. In diesem Begrenztsein der Anwendbarkeit von Leuchtstoffen für die Überbrückung von Intermittenzen der Netzhauterregung liegt auch die Erklärung dafür, daß Versuche, mit Hilfe hoher Abklingzeitkonstanten von besonders präparierten Silikat-Phosphoren statt des einfachen Zeilensprunges, mit 2 Halbrastern, einen solchen mit 3 Drittelrastern von je $^1/_{50}$ sek Dauer (Zeilen 1, 4, 7 . . .; 2, 5, 8 . . .; 3, 6, 9 . . .) einzuführen (was, vom Standpunkt der stroboskopischen Verschmelzungsgesetze aus gesehen, noch genügende Kontinuität des kinematographischen Effektes zuließe), an der psychologischen Reaktion der Betrachter gescheitert sind. Um den störenden Eindruck solcher Raster, eine Art vorgetäuschter Schüttelbewegung des Zeilenpaketes, auf erträgliche Grade herunterzusetzen, müßte man nämlich Nachleuchtdauern der Größenordnung 60 msek fordern. Da jedoch selbst langsamere Bewegungen und Helligkeitsverlagerungen im Gesichtsfeld der Fernsehkamera während einer solchen Zeitspanne merkliche Verschiebungen auch im Fernbild bedeuten, werden die bewegten Konturen durch das lange Nachleuchten „geisterartig" verdoppelt, ja verdreifacht, zum

mindesten aber verwischt. Kürzere Abklingzeiten hinwiederum reichen nicht aus, um das unangenehme Schüttelphänomen in erträglichem Grade zu vermindern.

Die Störungen der Bildwiedergabe durch *schnelle* Bewegungen des Übertragungsobjekts haben bei lange abklingenden Leuchtstoffen die Erscheinungsform von *Nachbildern* und von groben Verwischungseffekten, also Kontrastverzerrungen. Hinzu kommt dabei die geometrische, nicht physiologische Ursache der *Koordinaten*verzerrung und des Ausfallens bestimmter Bewegungsphasen, ein Phänomen, das aus der endlichen Geschwindigkeit des Abtastvorganges folgt und dessen Behandlung in das Kap. V gehört.

5a. Kontrast, Grauskala, Gamma.

Die Bedeutung des Kontrastes für die Steigerung der physiologisch-psychologischen Einzelfähigkeiten, aus denen sich bei der Erfassung, zumal flüchtiger, Bilder oder Vorgänge die Gesamtfunktion des menschlichen Gesichtssinnes zusammensetzt, ist seit längerer Zeit Objekt der Lichttechnik und der Arbeitsphysiologie. In den letzten Jahren haben aber auch die hohen Anforderungen an die Güte der Fernsehübertragung, die Bedingung unverzerrter Wiedergabe der Grauskala bei Nebenlicht auf dem Empfangsschirm, zahlreiche Untersuchungen notwendig gemacht, die auf der Grundlage der Kontrastgesetze fußen. Die Wichtigkeit dieser Gesetze für die Fernsehtechnik ist dabei immer deutlicher geworden.

Soweit es sich um zeitlich unveränderliche Vorlagen oder Bildfelder handelt, hat hauptsächlich die Photographie zur Aufstellung quantitativer Beziehungen beigetragen, die dann unter Hinzunahme der psychologischen Wahrnehmungsgesetze auf die Kinematographie und später auch auf das Fernsehen übertragen werden konnten. Nur die unentbehrlichsten dieser Empfindungsgrößen seien hier berücksichtigt.

Schon die Definition des Begriffs „Kontrast" stößt auf Schwierigkeiten. An der Grenze des okularen Auflösungsvermögens ist nicht zu unterscheiden, ob wir zwei Objekte auf Grund der „Sehschärfe" oder auf Grund des „Kontrastes" zu trennen vermögen. Die Schroffheit eines Helligkeitssprunges, die uns der Gesichtssinn vermittelt, ist eine Funktion der überschrittenen Helligkeitsdifferenz (s. S. 23). Wir müssen daher annehmen, daß die Sehschärfe nicht ausschließlich *geometrisch*, d. h. durch Zapfengröße und Zapfenabstand auf der Netzhaut, bedingt ist, sondern daß dabei der energetische Unterschied der Beleuchtung benachbarter Netzhautelemente eine bedeutende Rolle spielt. Dies folgt auch aus der S. 23 mitgeteilten Abhängigkeit des Kontrastes von der absoluten Helligkeit. Im allgemeinen versteht man unter „Kontrast" die Empfindung einer Verschiedenheit der Lichtstärke beim Vergleich von Flächenstücken, die sich berühren, aber vom Auge deutlich getrennt werden. Häufig spricht man dabei vom „Umfeldkontrast", um anzudeuten, daß sich das betrachtete Flächenelement von seiner Umgebung durch die empfundene Helligkeit abhebt.

Nach dem Grundgesetz von WEBER-FECHNER sind Empfindung E und Reiz J durch die Beziehung

$$dE = K \cdot \frac{dJ}{J} \qquad \text{(II.10)}$$

miteinander verknüpft. In seiner Integralform $E = K \cdot \ln J + C$ sagt dieses Gesetz aus, daß die physiologische Empfindung in arithmetischer Progression wächst, wenn der sie auslösende physikalische Reiz, hier die Stärke des lichterregenden Vorganges, in geometrischer Progression zunimmt. Es entstehen daher

gleiche Differenzen $E_1 - E_2$, $E_2 - E_3$, $E_3 - E_4 \ldots = \Delta E$, wenn

$$\frac{J_1}{J_2} = \frac{J_2}{J_3} = \frac{J_3}{J_4} = \ldots \quad \text{bzw.} \quad J_2 = a\, J_1,\; J_3 = a^2\, J_1,\; J_4 = a^3\, J_1 \ldots$$

ist. Um die Schwelle ΔE zu erreichen, muß ΔJ_n dem Betrag J_n proportional sein. Diese Gesetzmäßigkeit bildet die Grundlage der Grauleiter von W. OSTWALD. Man ginge jedoch fehl in der Annahme, daß die Kontrastskala lediglich von den Verhältniswerten J_1, J_2 usw., nicht aber von der *absoluten* Helligkeit der verglichenen Flächen abhänge. Die Fähigkeit des adaptierten Auges zur Wahrnehmung von Kontrasten steigt, von geringen, unter 1 Lux betragenden Beleuchtungsstärken einer weißen Fläche ausgehend, zunächst stark an, bleibt dann in einem weiten Bereich annähernd konstant und fällt hernach infolge Blendung wieder ab. Die gemessenen Werte schwanken allerdings erheblich. Nach L. SCHNEIDER [*20*] wächst die Kontrastempfindlichkeit von 0,1 Lux bis zu 200 Lux auf das 9fache, um darüber hinaus bis zu $2 \cdot 10^4$ Lux eine praktisch unveränderliche Größe zu behalten. Hingegen gibt H. HERTWIG [*21*] an, daß konstante Kontrastempfindlichkeit schon etwa bei 3 Lux erreicht wird und die Abnahme erst oberhalb $3 \cdot 10^5$ Lux beginnt. In dem Bereich der Konstanz soll ein Helligkeitsunterschied von $2 \cdots 3\%$ wahrnehmbar sein. Mit Sicherheit geht aus allen Beobachtungen hervor, daß die Konstante K des WEBER-FECHNERschen Gesetzes noch in dem Intervall der Beleuchtungsstärken, die der Leuchtschirm einer BRAUNschen Röhre für direkte Bildbetrachtung liefert, merklich anwächst. Diese Tatsache ist für die Festlegung der unteren Helligkeitsgrenze wichtig.

Die statistische, durch die Rauschspannung verursachte Schwankung der Bildpunktintensität des Fernsehbildes hat physiologisch zur Folge, daß die Kontrastempfindlichkeit des Auges sich erheblich verschlechtert. Ein $\frac{dJ}{J}$ von 0,02...0,03 ist nach dem heutigen Stande selbst in den hellsten Lichtern problematisch. Auf die Einengung und Verzerrung der Kontrastskala durch störendes, von außen auf den Schirm fallendes Nebenlicht (das im Prinzip durch Verdunklung des Empfangsraumes vermieden werden kann), kommen wir später zurück. Bei der BRAUNschen Röhre aber bestehen auch innere Ursachen der Kontrastverminderung als grundsätzliche Mängel oder als Folgen fehlerhafter Ausführung, nämlich: 1. Totalreflexion der vom bildschreibenden Lichtpunkt ausgehenden Strahlen in der Glasschicht der Röhrenwand (Lichthofbildung), 2. Krümmung des Leuchtschirmes, also gegenseitige Zustrahlung von Flächenelementen desselben, 3. Spiegelung am hinteren Teile des Röhrenkolbens, 4. Aufprall von Streuelektronen, 5. Lichtstreuung in der Kristallschicht des Leuchtphosphors. Sämtliche genannten Einflüsse wachsen proportional der mittleren Bildhelligkeit. Sie äußern sich hauptsächlich im Herabsetzen des Kontrastes unmittelbar benachbarter Bildelemente. d. h. der für die Zeichenschärfe der Röhre wichtigsten Eigenschaft. Man spricht deshalb von „Einzelheiten - Kontrast“ („detail contrast“), um anzudeuten, daß der Vergleich sich nicht auf beliebig zueinander liegende Flächen bezieht, sondern auf ein kleinstes Flächenstück im Verhältnis zu seinem unmittelbaren Umfeld. Ein Teil der genannten, den Detailkontrast auf dem Schirm der BRAUNschen Röhre vermindernden Einflüsse ist durch die Aluminisierung der Phosphorschicht beseitigt, aber die Ursachen unter 1., 4. und 5. bestehen im Prinzip weiter. Während früher bei einem durch die Strahlstromstärken gegebenen Intensitätsverhältnis der Lichterregung von 1 : 100 ($J_{\min}$ bzw. $J_{\max}$) infolge der genannten Einflüsse der Kontrastbereich auf etwa 14 : 100 = 1 : 7 zurückging, hat die Aluminisierung diese Werte auf 3...5 : 100 = 1 : 33 bis 1 : 20 gestei-

gert. Unabhängig von dieser Verbesserung bleibt jedoch im Fernsehbild die Kontrastempfindlichkeit infolge des Rauschens, das man der dadurch bedingten, körnigen Lichtstruktur wegen vielfach als „Störgrieß" bezeichnet, im Verhältnis zu natürlichen Bildern stark verschlechtert. Ein gedrucktes Bild benötigt, um die Feinheiten der Tönung gut wiederzugeben, etwa 30 unterscheidbare Grauwerte. Der normale Helligkeitsumfang $J_{\max}/J_{\min}$ ist dabei 6...13. Nun gilt auf Grund des WEBER-FECHNERschen Gesetzes die Beziehung

$$J_{\max} = \left(\frac{J + \Delta J}{J}\right)^p \cdot J_{\min}, \tag{II.11}$$

wenn ΔJ der für die Überschreitung der Unterschiedsschwelle erforderliche prozentuale Helligkeitszuwachs und p die Anzahl der Kontraststufen ist. Setzen wir demgemäß $p = 30$ und $J_{\max}/J_{\min} = 6$ bzw. $J_{\max}/J_{\min} = 13$, so folgt aus

$$\log \frac{J_{\max}}{J_{\min}} = 30 \cdot \log \left(\frac{J + \Delta J}{J}\right)$$

für ΔJ der Wert von 6% bzw. 8,9%. Diese Zahlen beweisen, daß bei Betrachtung des Bildes die Unterschiedsschwelle höher angenommen werden muß, als die weiter oben angegebenen physiologischen Grenzwerte vermuten lassen. Untersuchungen an einer BRAUNschen Röhre mit weiß leuchtendem Schirm haben bestätigt, daß die wahrnehmbare Schwelle in dem praktisch ausgenutzten Bereich, d. h. von 1 μA bis 80 μA Variation der Strahlstromstärke bei 8000 V Anodenspannung und etwa $25 \times 20\,\text{cm}^2$ Bildfeld, mit dem vorstehend für $J_{\max}/J_{\min} = 6$ berechneten Wert von $\Delta J = 6\%$ gut übereinstimmt. Um ein $J_{\max}/J_{\min} = 6$ hervorzubringen, ist natürlich in Anbetracht der Kontrasteinbuße ein erheblich höheres Aussteuerungsverhältnis der Strahlstromstärke als 6 erforderlich; immerhin aber liefert bei einer gut gebauten BRAUNschen Röhre das oben angegebene Steuerintervall 1 μA bis 80 μA weit mehr als 30 unterscheidbare Helligkeitsstufen.

Die vorstehenden Zahlen entsprechen dem theoretisch Mindestnotwendigen. In der Praxis wird man stets bemüht sein, den Helligkeitsumfang schon mit Rücksicht auf Nebenlicht so groß wie möglich zu machen. Heutzutage werden dafür 1 : 30 bis 1 : 100 als wünschenswert angesehen.

5b. Einfluß der Adaptation des Auges.

Die bloße Angabe von Zahlenverhältnissen wird jedoch den physiologischen Tatsachen ebensowenig gerecht, wie die unkritische Benutzung des WEBER-FECHNERschen Gesetzes. Vielmehr kommt es entscheidend auf den *Adaptationszustand* des Auges beim Betrachten des Leuchtschirmes an, d. h. auf die Anpassung des okularen Regelapparates an die mittlere Helligkeit (sei es der Umgebung des Bildes, sei es des Bildfeldes selbst oder eines Teiles davon). Auch die Schnelligkeit, mit welcher dieser Regelmechanismus arbeitet, spielt eine Rolle. Bei steigender Adaptationsleuchtdichte wächst in stetiger Weise die Unterschiedsschwelle ΔB von B, die zur Wahrnehmung eines Tönungskontrastes nötig ist. Der B-Wert, unterhalb dessen alle minderen Leuchtdichten nivelliert, d. h. unterschiedslos als schwarz empfunden werden, hängt demgemäß ebenfalls davon ab, auf welchen integralen Lichtstrom die Irisblende des Betrachters sich eingestellt hat. Dabei gehen zusätzlich der Gesichtswinkel der beobachteten Fläche sowie deren Gestalt und Umfeldbeleuchtung ein.

Ist z. B. unser Auge auf eine Zone von der mittleren Schirmleuchtdichte 10 asb (Apostilb) adaptiert, so werden ihm darin alle Stellen mit $B_r < 0{,}1$ asb[1] als homo-

[1] B_r reflektierte Leuchtdichte in asb.

gen schwarz, d. h. die Modulation als unterdrückt erscheinen [22, 23]. Bei unveränderter Helligkeitsverteilung im Bilde, aber Einstellung auf eine andere Gegend mit der wesentlich geringeren mittleren Schirmleuchtdichte 0,1 asb würden dagegen in diesem Bezirk individuelle B_r-Werte bis hinunter zu 0,003 asb noch als verschiedene Grautöne zur sinnlichen Wahrnehmung kommen. Die bei Adaptation auf 10 asb als sehr hell empfundenen, jedoch noch differenziert bewerteten Stellen fallen aber dann schon in das Gebiet der „Blendung" hinein. Diese Angaben beziehen sich auf den Gesichtswinkel 121′ der verglichenen Felder. Für 3,6′, also ziemlich nahe der Auflösungsgrenze, liegt die Unterschiedsschwelle bei 10 asb Adaptations-Schirmleuchtdichte bereits oberhalb 1 asb; es erscheinen daher alle Schattentöne minderer Leuchtdichte als 1 asb undifferenziert schwarz, und wenn in gleichem Falle auf 1 asb adaptiert wird, lassen sich nur die beträchtlich mehr als 1 asb messenden Flächenstücke als moduliert erkennen. Das bedeutet eine starke Verflauung der lichtschwachen Einzelheiten und zeigt, in wie hohem Grade der Adaptationszustand des Auges in die subjektive Bewertung einer objektiv übertragenen Tönungsskala eingehen kann. Näheres hierüber in Veröffentlichungen von H. R. Blackwell [22] und von P. R. Arendt [23].

5c. Einfluß von Störlicht.

In der Praxis des modernen Fernsehempfangs steigern sich diese physiologisch bedingten Verzerrungen und Begrenzungen der Grauskala durch die Störwirkung der von außen einfallenden Beleuchtung. Die Kontrastverminderung durch Streulicht oder Nebenlicht J' auf dem Bildschirm drückt sich im Weber-Fechnerschen Gesetz durch die Ungleichungen:

$$\log \frac{J_1 + J'}{J_2 + J'} \neq \log \frac{J_1}{J_2} \; ; \; \log \frac{J_2 + J'}{J_3 + J'} \neq \log \frac{J_2}{J_3} \quad \text{usw.}$$

aus. Angenommen eine Leuchtdichte J_n des Nebenlichtes und $J_n = J_{\min}$, so verkleinert sich der Kontrastumfang von $J_{\max}/J_{\min}$ auf

$$\frac{J_{\max} + J_{\min}}{2 J_{\min}} \simeq \frac{1}{2} \cdot \frac{J_{\max}}{J_{\min}},$$

falls $J_{\max} \gg J_{\min}$. Die Folgen dieser Einbuße sind, wie aus den nachstehenden Betrachtungen hervorgeht, erheblich [4].

Von einem Kinobild und daher auch von einem Fernsehbild wird verlangt, daß $J_{\max}/J_{\min}$ den Wert 30 habe (was bei $\Delta J = 6\%$ einer Grauskala von 58 Stufen entspräche, bei höherer Kontrastempfindlichkeit entsprechend mehr). Benutzt man, wie es für wünschenswert gehalten wird und tatsächlich geschieht, den Fernsehempfänger in einem normal beleuchteten Raum, so fällt auf seinen Bildschirm eine Beleuchtungsstärke von etwa 70 Lux an hellen Tagen. Nehmen wir ein Reflexionsvermögen der Schirmfläche von 75% an, so erscheint sie mit 52,5 Lux durch das Nebenlicht beleuchtet. Um dann in dem vom Kathodenstrahl erhellten Bildfeld das Verhältnis $J_{\max}/J_{\min} = 30$ aufrechtzuerhalten, müßten die Stellen höchster Leuchtdichte eine scheinbare Beleuchtungsstärke von 1575 Lux erhalten. Diese Forderung ist weder mit der Bedingung guter Bildschärfe (Strahlstromquerschnitt!) noch mit derjenigen völliger Flimmerfreiheit vereinbar.

Man hat daher den Kunstgriff angewendet, vor den Bildschirm ein mäßig absorbierendes Graufilter (Neutralfilter) zu setzen. Das von außen einfallende Nebenlicht muß dieses Filter im Hin- und Rückgang passieren, da es an der Schirmwand der Braunschen Röhre reflektiert wird; in Anbetracht des mit der Schichtdicke exponentiell wachsenden Betrages der Absorption wird es also wesentlich stärker geschwächt, als das aus der Röhre selber kommende, das

Filter nur einmal durchlaufende Fluoreszenzlicht des Bildes. Es mindert daher den Kontrast viel weniger als ohne Neutralfilter; dieses letztere setzt aber natürlich die Gesamthelligkeit des Bildfeldes erheblich herab. Um den Verlust mindestens teilweise wieder einzubringen, sucht man dann die Strahlstromstärke entsprechend zu steigern; das Abfallen der Bildschärfe durch unzulässige Vergrößerung des Schreiblichtpunktes zieht diesem Verfahren bald eine Grenze.

Angenommen, das Störlicht des Empfangsraumes erzeuge ohne Filter auf der Bildfläche ein reflektiertes $J_n \gg J_{\min}$, wo $J_{\min}$ dem dunkelsten Schwarz entspräche, das bei *unbeleuchtetem* Raum wiedergegeben werden kann. Mit $J_n = 0$ im Falle der Verdunklung wäre der Kontrastumfang $J_{\max}/J_{\min}$. Mit Nebenlicht auf den Bildschirm wird der Kontrastumfang (α) reduziert auf

$$\alpha = \frac{J_{\max} + J_n}{J_n}.$$

Bringen wir nun das Filter vor der Röhre an und ist dessen Durchlässigkeit $K < 1$ (also $0 < K < 1$), so sinkt das um das unabsorbierte Nebenlicht vermehrte Intensitätsmaximum auf

$$K \cdot (J_{\max} + K \cdot J_n)$$

und das Intensitätsminimum, das allein vom Nebenlicht bestimmt wird, auf

$$K^2 \cdot J_n.$$

Also ergibt sich der Kontrastumfang (α') jetzt zu:

$$\alpha' = \frac{K \cdot (J_{\max} + K \cdot J_n)}{K^2 \cdot J_n} = \frac{J_{\max} + K \cdot J_n}{K \cdot J_n}. \tag{II.12}$$

Die Vervielfachung α'/α ist somit:

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{(J_{\max} + K\,J_n) \cdot J_n}{K \cdot J_n \cdot (J_{\max} + J_n)} = \frac{J_{\max} + K\,J_n}{K \cdot (J_{\max} + J_n)}. \tag{II.13}$$

Da bei nicht zu starkem Nebenlicht $(J_{\max} + K \cdot J_n)$ nicht sehr verschieden ist von $(J_{\max} + J_n)$, wird die Vervielfachung des Kontrastumfanges

$$\frac{\alpha'}{\alpha} = \frac{1}{K}. \tag{II.14}$$

Das bedeutet z. B. bei $K = 0{,}33$ (Lichtdurchlässigkeit 33%) und einem Kontrastumfang *ohne Filter* von 10 : 1 eine Steigerung durch das Filter bis zu 30 : 1.

Trotz der unbestreitbaren Wirksamkeit der Neutralfilter hinsichtlich Verbesserung des Kontrastumfanges ist der absolute Helligkeitsverlust, den sie bedingen, ein schwerer Nachteil der Methode. Bei Telefunken wurden frühzeitig Versuche unternommen, um die Unschädlichmachung der störenden Raumbeleuchtung durch komplementäre spektrale Filterung zu erreichen [*24*]. Nach E. Kudar wurde als Filter eine Scheibe aus Neodymglas benutzt, das aus weißem Licht nur einen schmalen Streifen im Bereich der *D*-Linien des Natriums stark herausabsorbiert. Zur Raumbeleuchtung diente eine Natriumdampflampe, deren Licht nach dem zweimaligen Durchgang durch das Filter praktisch vollkommen verschluckt war. Das Bild erschien unverändert weiß, und es war keine Veränderung der Kontrastabstufung beim Wechsel von Abdunklung und Freigabe der Na-Dampflampe bemerkbar. Des stark monochromatischen Natriumlichtes wegen ist diese Kombination nur sehr beschränkt verwertbar. Besser wäre die Aufgabe gelöst, wenn es gelänge, Raumbeleuchtung und Bildschirmemission aus komplementären Zwei- oder Dreiheiten von Spektralbanden zusammenzusetzen, die sich nicht decken. Beispielsweise würde man mittels passend durchlässiger Glocken aus der Strahlung von Glühlampen Streifen in Rot, Gelb und Blau, insgesamt

also weißes Licht, zur Erhellung des Empfangsraumes ausfiltern, wogegen der Phosphor in der BRAUNschen Röhre dank geeigneter Mischung von Komponenten möglichst nur in den Bereichen Orange, Grün und Violett lumineszieren sollte, die sich ebenfalls zu Weiß ergänzen. Ein Filter aus Glas, Gelatine oder dgl., dessen spektrale Durchlässigkeit mit den Emissionsbanden des Leuchtschirmes gut übereinstimmt, aber in den Transparenzbereichen der Glühlampenglocke kräftig absorbiert, ließe dann das Bild nur wenig geschwächt und mit vollem Kontrast hindurchtreten. Violettes und langwelliges ultraviolettes Licht, das vom Glas des Röhrenkolbens nicht völlig absorbiert wird, sind als Bestandteile der Raumbeleuchtung besonders schädlich, wenn sie eine Lumineszenz des Leuchtphosphors auf der ganzen Schirmfläche erregen können; denn diese Emission wirkt sich als überlagertes Nebenlicht, also kontrastvermindernd aus.

5d. Weitere Einflüsse auf den Kontrast; Gamma.

Die Erhaltung des notwendigen Kontrastumfanges hängt jedoch noch von weiteren Bedingungen ab. Unter diesen interessieren besonders: 1. Die Umfeldbeleuchtung, 2. der Gammawert der Übertragung.

Hinsichtlich 1. ist bekannt, daß Sehschärfe und Kontrastempfindlichkeit ihr Optimum erreichen, wenn das Umfeld der betrachteten Fläche die gleiche Beleuchtungsstärke aufweist wie diese selber. Wird das Umfeld erheblich heller oder dunkler gemacht, so gehen die beiden genannten physiologischen Fähigkeiten zurück. Ein Fernsehbild sollte daher nicht absolut schwarz umrahmt, sondern von einer genügend breiten Zone umschlossen sein, die etwa die mittlere Bildhelligkeit besitzt; ja es ist anzustreben, daß die Umfeldbeleuchtung des Schirmes mit dem Mittelwert der Bildhelligkeit mitgehend gesteuert werden kann.

Die unter 2. zusammengefaßte Problematik hat erst in neuerer Zeit die ihr gebührende Beachtung gefunden. Sie betrifft nicht die Frage einer absoluten Mindestzahl unterscheidbarer Helligkeitsstufen im Fernsehbild, sondern die Verhütung einer *relativen* Intensitätsverfälschung bei der Übertragung eines Originals, das eine bestimmte Anzahl verschiedener Grauwerte enthält. Deren Abstufung soll bei der Reproduktion unverändert erscheinen, und zwar meistens unter veränderten Bedingungen hinsichtlich der mittleren Bildhelligkeit und des Bildwinkels. In der Photographie ist es üblich, von einem γ-Wert (Gammawert) zu sprechen. Dieser gibt die mittlere Neigung der Schwärzungskurve im Negativ wie im Positiv durch den entsprechenden $\operatorname{tg}\gamma$ an, d. h. jener Kurve, die für die lichtempfindliche Emulsion die Beziehung zwischen der wirksam gewordenen Lichtmenge B' und der Schwärzung S in der Form $S = f(B') = \log_{10} 1/Tr$ darstellt. Tr, die Transparenz der geschwärzten Stelle, ist der Kehrwert ihrer Opazität, also das Verhältnis der durchgelassenen zur auf sie fallenden Lichtintensität, B' das Produkt aus Lichtstrom und Zeit pro Flächeneinheit. Man trägt S als Funktion von $\log_{10} B'$ auf und erhält so eine im mittleren Bereich annähernd gerade Kennlinie, eben die Schwärzungskurve. Unverzerrte photographische Wiedergabe des ursprünglichen Tönungsverhältnisses setzt voraus, daß das Produkt der beiden $\operatorname{tg}\gamma$-Werte, des Negativs und des Positivs, so nahe wie möglich an 1 liegen soll. Mindestens gilt dies für den Fall etwa gleicher mittlerer Leuchtdichte in Original und Reproduktion. In der Kinematographie, die über starke Projektionslichtquellen verfügt, ist diese Bedingung weitgehend erfüllt, und hier hat sich die Gamma-Korrektur auf den Wert ~ 1 im photographischen Prozeß als sehr wirksam erwiesen. In der Beziehung

$$B_w = B_0^{\gamma},$$

wo B_w die mittlere Leuchtdichte auf dem Kinobildschirm, B_0 die mittlere Leuchtdichte im aufgenommenen Bildfeld bedeutet, soll also der Exponent, das Gamma der Übertragung, der Gleichung

$$\gamma \simeq 1$$

gehorchen.

Diese Forderung ist nun in den letzten Jahren auf das Fernsehen angewandt worden und hat auch hier zu großen Verbesserungen bei der originalgetreuen Wiedergabe der Halbtonskala geführt. In etwas unkritischer Formulierung, die wir später korrigieren werden, lautete die an das übertragende System gestellte Bedingung folgendermaßen: Das Produkt aller in der Kette der Übertragungsorgane durchlaufenen Kennlinien soll im ganzen Aussteuerbereich eine möglichst geradlinige Beziehung zwischen den Leuchtdichten des abgetasteten und des wiedergegebenen Flächenelements darstellen. Man mußte also anstreben, jede irgendwo eintretende nichtlineare Verzerrung durch spiegelbildliche Entzerrung auszugleichen. Teilt man die Aussteuerbereiche sämtlicher in Reihenschaltung wirkenden Kennlinien in korrespondierende Elementarstücke auf, so soll für jeden derartigen Teilbereich das Produkt aller Tangenten, die an das betreffende Kurvenstück in den einzelnen, verschieden verlaufenden Umformungscharakteristiken gelegt werden, die gleiche, im ganzen Steuerintervall konstante Größe besitzen. Es soll also in der Gesamtcharakteristik des Systems:

$$\text{Empfangsleuchtdichte} = f\ (\text{Sendeleuchtdichte})$$

der 2. Differentialquotient zum Verschwinden gebracht werden.

Diese Forderung ging von der Annahme aus, unser Auge sei befriedigt, wenn es auf dem Fernseh-Empfangsschirm die gleiche Anzahl von Helligkeitsstufen unterscheiden kann, wie im übertragenen Gesichtsfeld und dabei die Proportionalität zwischen sender- und empfängerseitiger Leuchtdichte für jede Stufe gewahrt ist. Dieser Zustand würde der Empfindung eines $\gamma = 1$ entsprechen. Er kann aber, worauf P. R. ARENDT [25] hingewiesen hat, nur eintreten, wenn im gesamten Intervall der Grauskala $B_w = B_0$ ist, da allein in diesem Falle das Gamma in der Beziehung $B_w = B_0^\gamma$ durchweg den Wert 1 hat. Außerdem besteht dabei die einschränkende Voraussetzung, daß das Auge auf die gleiche mittlere Leuchtdichte B_m des Empfangsschirmes adaptiert ist, die sich beim Betrachten des Originalbildes als Adaptationswert ergäbe. Die dann wahrgenommene Zahl von Halbtonstufen würde bei $\gamma = 1$ empfangsseitig vollständig und unverzerrt, mithin „empfindungsrichtig" wiedergegeben werden. Erfolgt jedoch die Sendung bei einer mittleren Leuchtdichte, die einer stärkeren Helladaptation entspricht, als der im Empfangsbild durch dessen B_m gegebenen, so muß die Übertragung die Halbtonskala dehnen. Im gegenteiligen Fall muß sie diese zusammenpressen. Nach welchen Gesetzen das zu geschehen hat, läßt sich aus statistischen Messungen von R. M. HANES [26] entnehmen. Er experimentierte mit zwei unter je 4,5° Bildwinkel beobachteten Testfeldern, von denen das eine konstant, das andere veränderlich belichtet war, und ließ das letztere durch zahlreiche Versuchspersonen bei verschiedenen festen Einstellungen des ersteren so regeln, daß das empfundene Helligkeitsverhältnis sich zwischen $^1/_3$ und 3 bewegte. Welche Leuchtdichten des regelbaren Feldes dann bei Adaptation auf die des konstanten Feldes zu den Punkten $^1/_3$, $^1/_2$, 1, 2, 3 der Empfindungsskala gehören, hängt von der Leuchtdichte dieses Bezugsfeldes ab. ARENDT hat die gefundenen Werte dazu benutzt, in einem doppeltlogarithmischen Koordinatensystem die für „empfindungsrichtige" Gammakorrektur maßgebende Beziehung zwischen der Sendeleuchtdichte bei verschiedener Adaptation und der Empfangsleuchtdichte auf dem

Schirm der Bildschreibröhre darzustellen, wobei für diese letztere ein den heutigen Verhältnissen angemessener Wert der Adaptationsleuchtdichte — 500 asb — gewählt wurde. Abb. 9 zeigt das Ergebnis. Die angenommenen Adaptationsleuchtdichten des Sendebildfeldes sind in 6 Stufen von $B_A = 5000$ asb bis $B_A = 0{,}05$ asb variiert. Die Empfindungsstufe 1 liegt auf dem Empfangsschirm voraussetzungsgemäß stets bei 500 asb. Man sieht, wie für jeden der im Sendebild gewählten Werte von B_A sich an jeder Stelle der Empfindungsskala ein bestimmtes Verhältnis der Sende- zur Empfangsleuchtdichte ergibt. Nur bei beiderseitiger Gleichheit von B_A, d. h. für 500 asb, ist die Kurve eine Gerade mit $\gamma = 1$. Bei den anderen Werten von B_A ist sie gekrümmt, d. h. $\gamma \neq 1$, und ihre Abweichung vom linearen Verlauf gibt die Gamma-Korrektur für empfindungsgerechte Wiedergabe der Halbtonskala an. In der Mitte der Kurve für $B_A = 5000$ asb (gedämpftes Tageslicht im Freien) entspricht ihre Neigung etwa einem $\gamma = 1$, dem das übertragende System genügen muß. Die hohen Leuchtdichten sind auf kleinere Unterschiede zusammenzupressen; die niedrigen hingegen zu dehnen. Bei $B_A = 50$ asb (gedämpftes Tageslicht in Wohnräumen) ist in den hellen Lichtern der umgekehrte Entzerrungsgang geboten, in den dunklen Halbtönen aber ein $\gamma = 1$ als angemessen zu betrachten. Angenommen, das gesamte Übertragungssystem sei bereits für $\gamma = 1$ korrigiert, dann geben die Kurven von Abb. 9a unmittelbar die notwendige zusätzliche Dynamikentzerrung an.

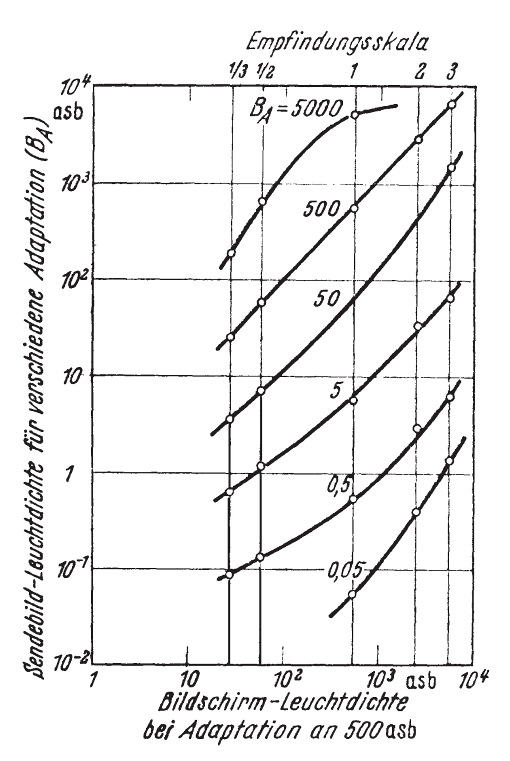


Abb. 9. Kurven für empfindungsrichtige Gamma-Korrektur nach P. R. Arendt, II. [25], bezogen auf 500 asb Adaptationsleuchtdichte auf dem Empfangsschirm. Bei Gleichheit mit der Adaptationsleuchtdichte im Sendebildfeld wird $\gamma = 1$ (Gerade).

Im allgemeinen sind die Kennlinien der Bildabtast- und der Bildschreibröhren, mit Ausnahme des Orthikon-Typus, keineswegs gerade, und ebensowenig trifft dies für die Zwischenglieder (Verstärker) zu. Andererseits sind die natürlichen Krümmungen der Übertragungscharakteristiken auch nicht so geartet, daß, über alles genommen, durch bloße Superposition eine ausreichende Linearisierung einträte, geschweige denn gerade diejenigen Kompensationen erreicht würden, die nach Abb. 9 für die verschiedenen Adaptationszustände erforderlich wären. Es wird daher ein Aufwand an zusätzlichen Entzerrungsmitteln unumgänglich. Dazu dienen Netzwerke, speziell geformte Röhrenkennlinien oder Verstärkungskurven [27], auf die Kap. IX dieses Bandes eingehen wird. Die Krümmung am Fußpunkt der Helligkeitssteuerkurve einer Braunschen Bildschreibröhre ist die störendste Quelle ungünstiger Gammawerte. Sie wirkt sich so aus, daß die dunkelsten Halbtöne stark verflacht werden, weil die ihnen entsprechenden Steuerspannungen infolge der zu geringen Neigung des untersten Kurventeils keine ausreichende Änderung des Schreibstrahlstromes hervorrufen können. Zur Kompensation dieser Verkürzung des Kontrastbereichs hat sich besonders die Ausgangskurve des Superikonoskops bewährt, dessen Charakteristik $U = f(B)$ etwa spiegelbildlich zur Kennlinie der Braunschen Röhre verläuft, so daß sich durch Zusammenwirken beider Röhren schon annähernde Geradlinigkeit ihrer Gesamtcharakteristik ergibt. Diese wäre dann nach Superposition der weiteren Über-

tragungskennlinien gemäß den Vorschriften von Abb. 9 auf das richtige Gamma zu korrigieren.

Ein unzulänglicher Kontrastumfang führt bei der Fernsehsendung im Empfänger zu falschen Einstellungen der mittleren Bildhelligkeit H_m, da man bestrebt ist, mangelnde Schwärze durch übertriebenes Herabsetzen von H_m künstlich hervorzurufen. Dabei muß dann das Verschwinden der für die Erkennbarkeit des Bildes so wichtigen Modulation an den dunkleren Stellen (und demnach ein schlechtes Gamma) in Kauf genommen werden. Diese Erfahrung der Praxis zeigt, wie wichtig es ist, auf das unverzerrte und ungeschmälerte Durchkommen des im Sendebild vorhandenen Kontrastbereichs hinzuarbeiten.

6a. Objektumfang, mittlere Bildhelligkeit, Wahrnehmungsgeschwindigkeit.

Wie schon in Kap. II. 3d erwähnt, hat die zur Verbesserung der Kontrast*empfindlichkeit* erwünschte Steigerung der Bildhelligkeit ihre Grenze in der Flimmererscheinung, wobei diese Grenze sich mit der Dauer des Nachleuchtens des Bildschirmes zu höheren Werten verschiebt. Andererseits kann, des Nebenlichtes wegen, die unterste Helligkeitsstufe nicht beliebig nahe an Null verlegt werden. Es fragt sich unter solchen Bedingungen, in welchem Umfang das natürliche Intensitätsverhältnis $J_{\max}/J_{\min} = \eta$ des Übertragungsobjektes innerhalb der für den Empfangsschirm gezogenen Grenzen wiedergegeben werden kann. Dazu seien hier einige Werte des Logarithmus $_{(10)}$ von η, den man den ,,Objektumfang'' nennt, zusammengestellt (nach H. Hertwig [*16*]).

1. Offene Landschaft mit Wolken . . . . . $\log_{10} \eta = 1{,}6 \cdots 1{,}8$
2. Offene Landschaft ohne Wolken . . . . . $\log_{10} \eta = 0{,}8 \cdots 1$
3. Menschlicher Kopf, blond . . . . $\log_{10} \eta = 1{,}0$
4. Menschlicher Kopf, dunkel . . . . $\log_{10} \eta = 2{,}0$
5. Portrait mit weiß-schwarzer Kleidung . . . $\log_{10} \eta = 2{,}0 \cdots 2{,}5$
6. Photographie mit stärksten Kontrasten . . $\log_{10} \eta = 1{,}6 \cdots 2$
7. Kinofilm . . . . $\log_{10} \eta = 1{,}78$.

Diesen Angaben entspricht also bei der kontrastreichsten Photographie ein Intensitätsverhältnis $\eta = 100:1$, beim Film $\eta = 60:1$. Man wird für das Fernsehbild den letztgenannten Wert anstreben und sich im Grenzfalle mit $30:1$, also einem Objektumfang der Wiedergabe von 1,48 zufriedengeben. Das bedeutet, wenn wir als Sendegegenstand den Extremfall Nr. 5 vorstehender Tabelle wählen, eine Verdichtung des Intensitätsverhältnisses von etwa $300:1$ auf $30:1$.

Nimmt man nun eine Kontrastempfindlichkeit von 5% oder 10% für das Fernsehbild an, so gestattet ein $\eta = 30$ rund 69 bzw. 36 Kontraststufen, während das Original mit $\eta = 300$ und bei heller Beleuchtung, die eine mittlere Kontrastempfindlichkeit von 3% anzunehmen erlaubt, 193 Kontraststufen umfaßt. Dies scheint auf den ersten Blick ein enormer Unterschied an Reichhaltigkeit der Abtönung zu sein und neben der Zeilenstruktur erheblich zur Erklärung des Qualitätsunterschiedes zwischen Original und Fernsehbild beizutragen. Dem ist jedoch nicht so: Könnten wir je 2 aufeinanderfolgende Graustufen der Abtastung des Originals zu einem einzigen mittleren Wert zusammenfassen, diese Skala aber mit dem richtigen Gamma übertragen, so würde der Gesamteindruck der Wiedergabe zweifellos recht befriedigend sein, was die Helligkeitsabstufung betrifft. Das Auge bewertet weniger die Zahl der Niveaus als das der Empfindung nach originalgetreue Intensitätsverhältnis der Stufenleiter von Halbtönen.

Wesentlich kommt es hingegen auf die mittlere Bildhelligkeit H_m an. Halten wir sie groß genug, um bis zu der durch das Nebenlicht gezogenen unteren Grenze eine ausreichende Anzahl von Graustufen zur Verfügung zu haben, so ist den

Anforderungen des Gesichtssinnes genügt. Das Zusammendrängen der Stufenzahl in den Helligkeitsspitzen ist bei großer mittlerer Bildhelligkeit weit weniger kritisch als die Nivellierung der Modulation in den Schattenzonen.

Eine gute BRAUNsche Bildwiedergaberöhre mit diffus zurückstrahlendem, aluminisiertem Schirm liefert bei 10 V und einem Spitzenstrom von 100 μA etwa 7,5 HK Gesamthelligkeit auf einer Fläche von 750 cm² in senkrechter Aufsicht. Die scheinbare Beleuchtungsstärke beträgt dann, wenn man das Reflexionsvermögen der Schirmwand zu 0,75 annimmt, rd. 400 Hefner-Lux. Um 30 Helligkeitsstufen zu erhalten, muß die Kennlinie, nötigenfalls linearisiert, bei 6% Unterschiedsschwelle bis hinunter zu ~ 70 Lux ausgesteuert werden können. Das Nebenlicht dürfte also nur ein kleiner Bruchteil von 70 Lux sein. Diese Forderung ist bei guter Raumbeleuchtung schwer zu erfüllen, wenn man kein Neutralfilter anwenden will. Andererseits liegen 400 Lux nach den Untersuchungen von O. H. SCHADE [3] für die europäische Feldfrequenz 50 Hz schon an und über der Flimmergrenze, außer bei sehr lange nachleuchtenden Schirmphosphoren (vgl. Abb. 5). Diese 400 Lux entsprechen den 7,5 HK Eigenstrahlung der angenommenen Fläche von 750 cm². Der Spielraum für den Kontrast ist also ohne Filter tatsächlich sehr beengt. Mit Filter aber ist der Lichtverlust erheblich.

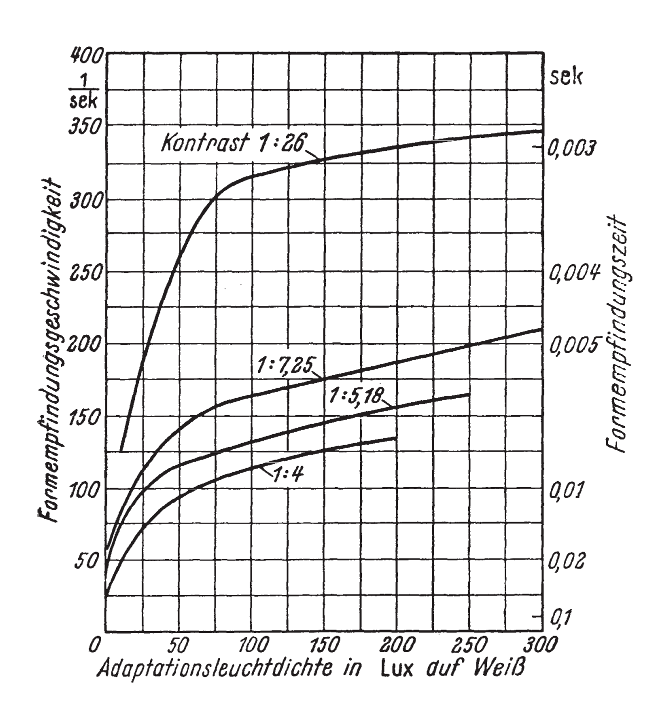


Abb. 10. Formempfindungszeit und Formempfindungsgescnwindigkeit als Funktion der Adaptationsleuchtdichte; Kontrast als Parameter.

Auch diese Festellung zeigt, wie erstrebenswert das Fernseh-Speicherbild ist, das infolge gleichzeitiger Aufhellung sämtlicher Flächenelemente keine Flimmergrenze hat und daher grundsätzlich bei bedeutend gesteigerter mittlerer Helligkeit entsprechend mehr Nebenlicht zuläßt, des Filters also vielleicht gänzlich entraten kann.

In normalen Bildern ist das Verhältnis der mittleren Helligkeit H_m (oder $\bar{H}$) zur maximalen $H_{\max}$ (oder $\hat{H}$) von der Größenordnung $^1/_3$ bis $^1/$. Ausnahmen liegen vor, wenn nur wenige dunkle Bildpunkte auf hellem Untergrunde vorhanden sind, oder umgekehrt. $H_m/H_{\max}$ nähert sich im ersten Falle dem Betrag 1, im zweiten dem Betrag 0.

Die Psychologen haben gefunden, daß die Leuchtdichte des belebten Bildes einen wesentlichen Einfluß auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit von Änderungen der Form oder Lage bestimmter Bildteile ausübt und auch aus diesem Grunde eine große mittlere Helligkeit geboten erscheint. Für das Fernsehen, als stroboskopischen Täuschungseffekt, haben derartige Untersuchungen eine noch zu wenig gewürdigte Bedeutung. Die „Unterschiedsempfindungsgeschwindigkeit" (z. B. bei Helligkeitsunterschieden) und die „Formempfindungsgeschwindigkeit" erreichen in weiten Grenzen mit wachsender Leuchtdichte immer günstigere Werte. Die Schwelle des Helligkeitskontrastes wird bei um so kürzeren Reizdauern überschritten, je größer die Helligkeit selber ist. Steigt diese linear

an, so sinkt die nötige Reizdauer scheinbar nach einem Exponentialgesetz. Der Zeitbedarf für das Bewußtwerden eines Formenunterschiedes wird geringer beim Zunehmen a) der Beleuchtungsstärke, b) des Kontrastes mit dem Umfeld, c) der Abmessungen des Objekts (Versuche von C. E. FERREE und G. RAND). Abb. 10 veranschaulicht die Abhängigkeiten a) und b). In dem für Fernsehen interessanten Gebiet steigt die Formempfindungsgeschwindigkeit mit der Leuchtdichte beträchtlich an; die Formempfindungszeit nimmt in der Gegend von 5 ··· 10 Lux (dunklere Grautöne) bei kleinem Kontrastumfang Werte an, die die Dauer des einzelnen Bildfeldes bereits überschreiten.

Man ersieht daraus, daß von der experimentellen Psychologie noch mancherlei Aufschluß über die Bedeutung der Wahrnehmungszeit für das Erfassen eines veränderlichen Bildinhalts erwartet werden kann; schon jetzt aber ist sicher, daß die mittlere Bildhelligkeit (H_m) alle maßgebenden Größen beeinflussen muß, und zwar stets in günstigem Sinne, wenn H_m selber steigt.

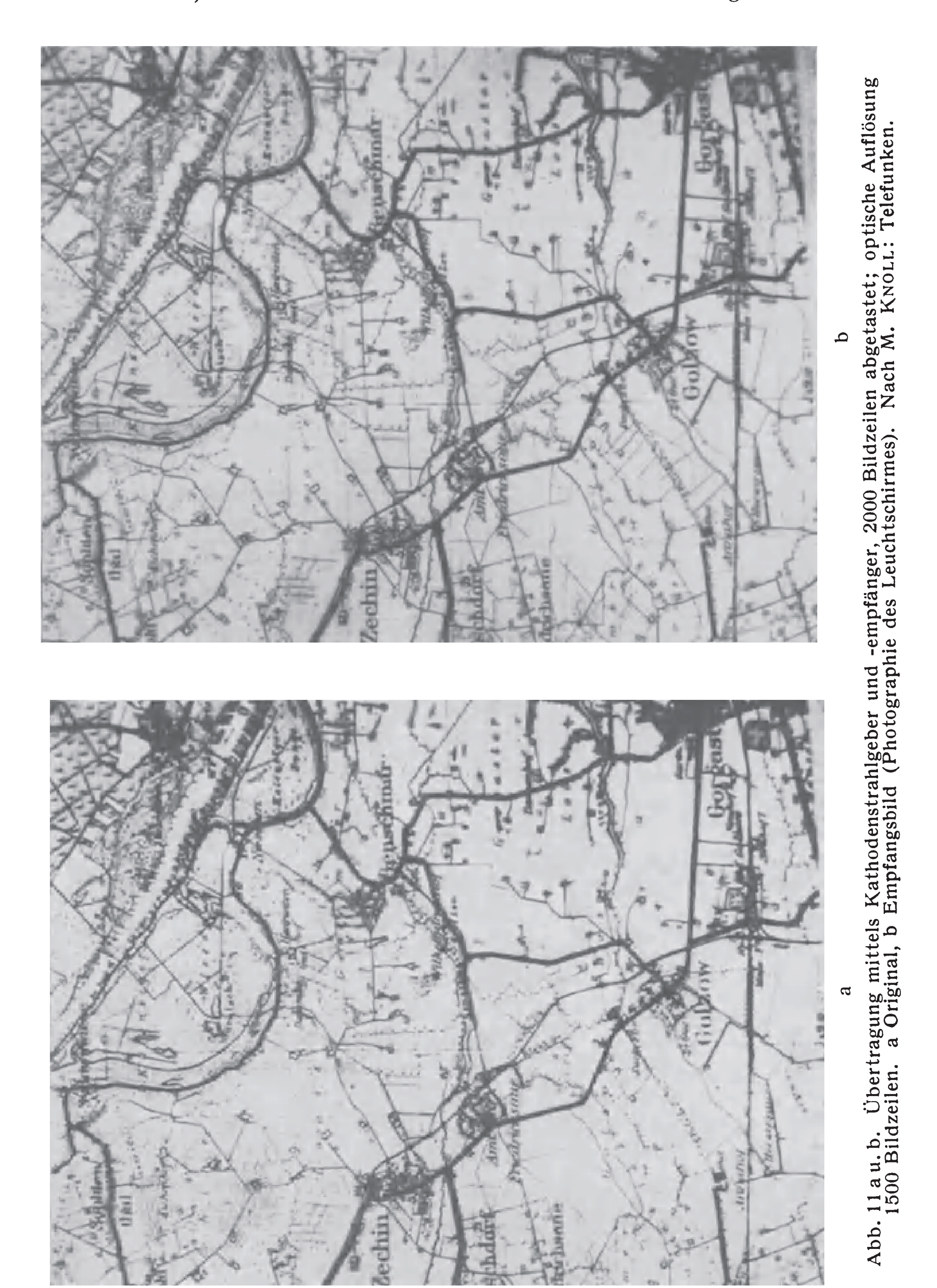
7a. Geometrische Faktoren der Bildwahrnehmung.

Während das Auge *homogene* Verzerrungen der Bildgeometrie, wie sie die gewölbte Schirmfläche der BRAUNschen Röhre hervorruft, in gewissen Grenzen willig hinnimmt, und einfach auf Grund von Erfahrung richtig umdeutet, werden infolge der Maßstabempfindlichkeit des Sehapparates *inhomogene* Verzerrungen, etwa solche durch nichtlineare Ablenkung des Kathodenstrahls, schon bei relativ kleinen Geometriefehlern unangenehm empfunden. Am schärfsten werden periodisch im Bildfeld wiederkehrende Fehler dieser Art wahrgenommen. Die Ablenkung soll daher von überlagerten Einschwingeffekten frei sein. Als Beispiel einer geometrisch getreuen Übertragung diene Abb. 11, das links das Original, rechts die Wiedergabe auf dem Leuchtschirm einer BRAUNschen Röhre mit ebenem Bildfelde und sorgfältig korrigierter Ablenkung nach beiden Koordinatenrichtungen zeigt. Die Auflösung beträgt, optisch gemessen, 1500 Zeilen, geschrieben wurden 2000 Zeilen. Unter Beachtung aller physiologischen und psychologischen Anforderungen des Gesichtssinnes darf eine solche Übertragung als fast vollkommen bezeichnet werden.

Auf die elektronenoptischen Bildfeldverzerrungen und ihre Bekämpfung wird in Kap. VII, auf die Linearisierung der Ablenkschaltungen in Teilbd. 2 dieses Bandes eingegangen; vom Stande beider Arbeitsgebiete hängt es ab, inwieweit eine saubere, koordinatengetreue Wiedergabe im Fernsehbild erzielt werden kann.

Ein weiterer wichtiger Faktor geometrischer Art ist der *Bildwinkel.* Wir behandeln seinen Einfluß zunächst unter Annahme einer BRAUNschen Röhre mit unmittelbar betrachteter Schirmfläche. Deren Strahlungsdiagramm, als Summe der Diagramme aller wirksamen Flächenelemente, ist etwa hemisphärisch, wie dasjenige einer mattweißen, vollkommen diffus reflektierenden Lichtbildwand. Daher erscheint der Leuchtschirm innerhalb beträchtlicher Winkel mit der Flächennormalen gleichmäßig hell. Von diesem Vorteil können wir jedoch nur in begrenztem Umfang Gebrauch machen. Auch bei Außerachtlassung der störenden Kolbenkrümmung beschränkt allein schon die bei schräger Daraufsicht eintretende Formatverzerrung, d. h. die scheinbare Fälschung des Verhältnisses der Horizontalkoordinate zur Vertikalkoordinate, den zulässigen Betrachtungswinkel. Im Kino sieht man $\pm 45°$ als Höchstwert für die Neigung der Blickrichtung zur Flächennormalen an. Für die BRAUNsche Röhre wird man wegen des Hinzukommens der Schirmwölbung $\pm 30°$ als zulässig annehmen dürfen. Im ganzen stehen uns also als ausnutzbarer Winkel 60° zur Verfügung. Dies gilt für die horizontale Richtung. In der vertikalen kommt man mit einem

viel kleineren Winkel aus, weil bei der direkten Bildbetrachtung die Augenhöhe nicht erheblich schwankt. Daher wird im lotrechten Schnitt die Forderung von 60° nicht erhoben, und dieser Umstand erklärt die Bemühungen, das vertikale



a b

Abb. 11 a u. b. Übertragung mittels Kathodenstrahlgeber und -empfänger, 2000 Bildzeilen abgetastet; optische Auflösung 1500 Bildzeilen. a Original, b Empfangsbild (Photographie des Leuchtschirmes). Nach M. KNOLL: Telefunken.

Strahlungsdiagramm der BRAUNschen Röhre unter Gewinn an Leuchtdichte auf einen engen Winkel zusammenzudrücken. Wir sehen davon hier ab und setzen voraus, daß die durchschnittliche Augenhöhe der Zuschauer mit der waagerechten Mittellinie des Empfangsbildes zusammenfällt. Aus der dann übrigbleibenden Festlegung eines horizontalen Nutzwinkels von 60° ergeben sich räumliche Anfor-

derungen, die von der Zahl und Anordnung der Personen vor dem Leuchtschirm abhängen.

Infolge der Zeilenrasterung ist es nun erwünscht, denjenigen Betrachtungsabstand zu wählen, in dem die Wahrnehmung getrennter Lichtpunktbahnen gerade aufhört, d. h. der Gesichtswinkel der einzelnen Zeile an der Grenze der menschlichen Sehschärfe angekommen ist[1]. Diese kritische Entfernung wächst naturgemäß mit geringer werdendem k, und umgekehrt nimmt der ihr zugeordnete Bildwinkel ab. Solange daher k nicht beliebig gesteigert werden kann, zwingt uns die Natur unseres Sehapparates beim Gebrauch eines Fernsehempfängers zur Innehaltung bestimmter Mindestabstände, die durch k, die Bildhöhe q und die normale Auflösungsfähigkeit des Auges festgelegt sind. Andererseits läßt sich auch stets ein Höchstabstand definieren. Er hängt davon ab, wie weit wir den Gesichtswinkel der einzelnen Bildzeile unter den Grenzwert der mittleren Sehschärfe herabsinken lassen, in welchem Ausmaß wir also tatsächlich übertragene Einzelheiten preisgeben wollen. Die in Kap. II. 4a erörterten Komplikationen, die das Zeilensprungverfahren in diese Überlegung hineinbringt, müssen im folgenden berücksichtigt werden.

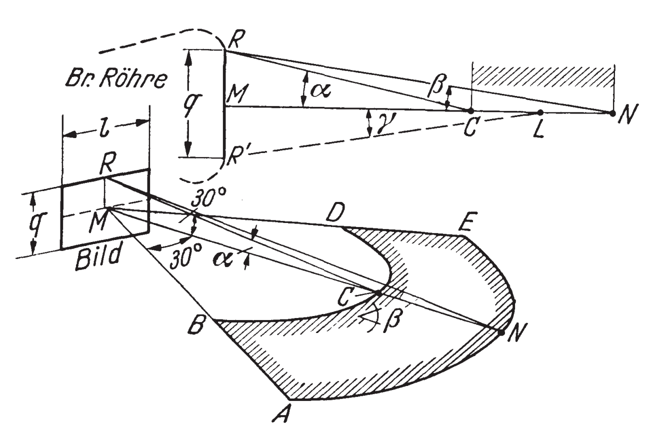


Abb. 12. Hilfsfigur zur Ableitung von Schirmgröße und Bildwinkel bei 625 Zeilen und direkter Bildbetrachtung.

Abb. 12 zeigt links das Fernbild von der Höhe $q = 2\,MR$; MN ist das auf seinem Mittelpunkt errichtete Lot, das den 2mal 30° einschließenden Betrachtungswinkel AME halbiert. In dem schraffiert umrandeten horizontalen Feld sollen sich die Pupillen der Zuschauer befinden. Dieses Feld entsteht, indem man um M mit dem Mindestabstand MC den inneren, mit dem Höchstabstand MN den äußeren Begrenzungskreisbogen schlägt. Längs BCD bzw. ANE sind dann die halben Bildwinkel in der Vertikalen gegeben durch

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{MR}{MC}\;;\;\operatorname{tg}\beta = \frac{MR}{MN} \qquad \text{(II.15)}$$

Für einen Kreis im mittleren Abstand gilt:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{MR'}{ML} = \frac{MR}{ML}\,. \qquad \text{(II.16)}$$

Innerhalb der Fläche $ABCDEN$ sollen beispielsweise längs BCD 4 und längs ANE 6 Personen Platz finden. Setzen wir $MC = 2$ m, $NC = 0{,}8$ m, so beträgt die Bogenlänge BCD rund 2,1 m, die Bogenlänge ANE rund 2,9 m. Diese Werte genügen für 4 + 6 Augenpaare in je etwa 60 cm seitlicher Entfernung voneinander. Welche Bildschirmgröße ergibt sich hieraus unter Beachtung der Sehschärfe? Wenn wir als angemessene Beleuchtungsstärke des Schirmes im Mittel 50 Lux zugrunde legen, so beträgt die menschliche Sehschärfe durchschnittlich $< 1{,}5'$. Mit Rücksicht auf die durch das Rauschen verursachte „Körnigkeit" des Empfangsbildes wollen wir zunächst den Wert 1,5′ beibehalten. Die Zeilen*rasterung* verschwindet also, wenn gemäß Abb. 12 von sämtlichen Punkten der

[1] Als einzelne Zeile ist eine Bahn von der Breite q/k (Bildhöhe : Zeilenzahl) zu verstehen, also die Zeilenbreite als Summe der Breiten von Zeilenstrich und Zeilenlücke definiert.

schraffiert umrandeten Zone aus gesehen die Spurbreite der Zeile unter 1,5′ oder weniger erscheint. Zur Vermeidung von Zeilen*flimmern* und Zeilen*wandern* (vgl. Kap. II 4a) ist es nun aber unerläßlich, den vertikalen Gesichtswinkel der einzelnen Zeile auf 1′ herabzusetzen. Bei $k = 625$ begrenzt daher die Zeilensprungmethode den Bildwinkel für die volle Höhe q in Abb. 12 auf $625 \cdot 1' = 10° 25'$. Ordnet man diese Vorschrift der vorderen Zuschauerreihe zu, so ergibt sich wegen $MC = 2$ m aus $\operatorname{tg} 5° 12{,}5' = MR/MC$ eine Schirmhöhe des Fernsehbildes $q = 2\,MR \approx 36{,}4$ cm. In der hinteren Zuschauerreihe wäre damit der Bildwinkel $2\beta \approx 7° 26'$, und für den mittleren Betrachtungsabstand gälte $2\gamma \approx 8° 42'$. Die entsprechenden, wirklich aufgelösten Zeilenzahlen sind für diese großen Entfernungen dann bei 1′ Sehschärfe $k' \approx 446$ bzw. 522 und bei 1,5′ Sehschärfe $k'' \approx 300$ bzw. 350. In der vordersten Reihe wäre die 1,5′ entsprechende Auflösung $k''' = 417$.

Dem berechneten $q = 36{,}4$ cm entspricht bei einem Formatverhältnis $q : l = 1 : 1{,}25$ die Bildbreite $l \approx 45{,}5$ cm. Diese Abmessungen sind für BRAUNsche Röhren mit direkter Bildbetrachtung beim heutigen Stande der Technik noch gerade erreichbar (Kap. XII), falls eine leichte, nicht störende Bildfeldkrümmung des Röhrenkolbens bzw. -fensters zugelassen wird, die aus Sicherheitsgründen unvermeidbar erscheint.

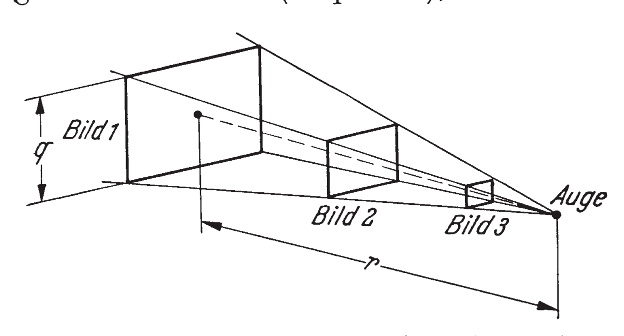


Abb. 13. Nicht die absolute Bildgröße, sondern der Bildwinkel ist maßgebend, d. h. das Verhältnis Bildhöhe/Betrachtungsabstand (q/r).

Im Lichtspieltheater gilt als günstigster Bildwinkelbereich in der Horizontalebene 12°···24°, in der Vertikalebene bei dem angenommenen Formatverhältnis $q : l$ demnach etwa 10°···20°. Der oben errechnete Bildwinkel von 10° 25′ in der Senkrechten fällt also bereits in das optimale Gebiet hinein. Daran ändert sich auch nichts, wenn wir q bzw. l verkleinern und entsprechend näher an den Leuchtschirm heranrücken, denn, wie es Abb. 13 verdeutlicht, kommt es nur auf den *Winkel* an, unter dem wir das Bildfeld sehen, nicht auf dessen absolute Maße. D. h. ein Schirm von 18,2 cm Höhe leistet bei 1 m Mindestentfernung unter den obigen Annahmen genau das gleiche, abgesehen von der Verminderung der Anzahl unterzubringender Zuschauer. Große Bildwurfflächen sind für Fernsehen nur sinnvoll, wenn es darauf ankommt, zwischen dem nach Vorstehendem ermittelten Minimalabstand [als $f(k)$ bei gegebener Sehschärfe] und dem Maximalabstand, bei dem noch kein untragbarer Verlust an Auflösung eintritt, für möglichst viele Personen Platz zu gewinnen, mit anderen Worten, für Fernseh-Kinos.

Die Verkleinerung der Betrachtungsentfernung bei proportional vermindertem q und l verbilligt nicht nur Röhre und Apparatur, sondern läßt überdies bei gleicher Strahlleistung größere Leuchtdichten, also günstigere Kontrastverhältnisse zu. Da sich der Bildwinkel dabei nicht ändert, erfährt die scheinbare Bildfeldgröße keine Verringerung. Allerdings wächst nun auch die Auffälligkeit des Zwischenzeilenflimmerns, so daß dieses besonders streng berücksichtigt werden muß.

7b. Betrachtungsverhältnis („viewing ratio“).

Mit der Verkleinerung der auf der Netzhaut des Auges ausgeleuchteten Zone hängt es zusammen, daß, wie sich auch aus den Ausführungen auf S. 33 ergibt, die Frequenzschwelle des Flimmerns, d. h. die eben noch zulässige unterste Fre-

quenz der intermittierenden Aufhellung, um so mehr absinkt, je größer das Verhältnis ϱ = Betrachtungsabstand : Bildhöhe („viewing ratio“) wird. In der Gegend von $f_f = 50$ Hz fällt unter den Bedingungen des Fernseh-Bildaufbaus nach den von O. H. SCHADE [3] veröffentlichten Kurven die kritische Frequenz, oberhalb deren bei gegebener Leuchtdichte und Abklingcharakteristik des Schirmes das Flimmern aufhört, um etwa 10% ab, wenn ϱ sich von 4·· 5 auf 15 erhöht. Wir folgerten bereits auf S. 32, daß das Flimmern in ausgedehnten, homogen erhellten Zonen des Bildfeldes bei geringeren Beleuchtungsstärken erscheinen muß, als auf kleinen Lichtflächen. Damit stimmen die Befunde von HAANTJES und DE VRIJER (S. 33) einerseits und von SCHADE (S. 35) andererseits im Wesentlichen überein. Die Beobachtung, daß an Orten feinen Details, also räumlich gedrängten Wechsels von Hell und Dunkel, die Flimmerfrequenz tatsächlich stark herabgeht im Verhältnis zu größeren Zonen gleichbleibender oder wenig veränderlicher Leuchtdichte, hat zu einem später zu behandelnden Vorschlag geführt, der bezweckt, ohne Verbreiterung des Übertragungs-Frequenzbandes mehr Einzelheiten als bisher im Fernbild wiederzugeben (Kap. V. 4a).

8a. Die Abtastempfindlichkeit des Auges, zusammenwirkende Parameter der Auflösungsgrenzen.

In den Fernsehlaboratorien und -aufnahmeräumen sind normierte Testvorlagen gebräuchlich, deren Übertragung auf dem Bildschirm eines Kontrollempfängers das richtige Arbeiten der Zwischengeräte hinsichtlich Auflösung (wahrnehmbarer Zeilenzahl), Gradation, Helligkeitsumfang und Geometrie zu prüfen gestattet (und daneben den Rauschabstand des Bildsignals, Einschwingvorgänge, Echos u. a. erkennen läßt). Die Halbtonabstufung wird nach der Wiedergabe eines Graukeils, die Abweichung von idealer Geometrie an Hand der Verzerrung eines Kreises beurteilt. Zur Bestimmung der Auflösung in beiden Koordinatenrichtungen dienen vertikale und horizontale Strichmuster, denen unmittelbar die äquivalenten Zeilenzahlen oder Frequenzbandbreiten zugeordnet werden können. Strichdicke und Zwischenraum sind bei diesen Mustern gleich; die Strichzahl pro Längeneinheit geht von groben bis zu den feinsten Teilungen, deren okulare Auflösung, d. h. Erkennbarkeit als Strich*raster*, auf Grund der angenommenen Frequenzdurchlässigkeit und Phasenkurve des übertragenden Systems sowie der bekannten Schärfe des bildschreibenden Lichtpunktes (bzw. auf Grund der gewählten Zeilenzahl) gerade noch erwartet werden kann; ja sogar etwas weiter. Geeignete Testvorlagen sind von der amerikanischen Radio Manufacturers Association (RMA, s. Abb. 14, Norm 1946) und von der RCA (Abb. 15) angegeben worden. Ihr charakteristischer Bestandteil sind keilförmig divergierende Systeme von schwarzen und weißen Linien, die nach der Keilschneide zu immer schmäler und dichter werden. Daneben gedruckte Ziffern geben ein direktes Maß der entsprechenden Zeilenzahl bei bekannter relativer Vergrößerung oder Verkleinerung im Verhältnis zur Sendeseite. Man achtet in beiden Koordinatenrichtungen auf die Grenze gerade nach möglicher Unterscheidung der einzelnen Keillinien; jenseits dieser Grenze verschwimmen sie zu einer ungerasterten Fläche.

Dies vorausgeschickt, wollen wir betrachten, was in der Gegend der versagenden Auflösung durch das Auge vor sich geht und in welcher Weise der Kontrast mitwirkt, wenn wir nach den physiologischen Kriterien der Wahrnehmbarkeit kleiner Einzelheiten fragen. Die Mindestabmessungen dieser Einzelheiten werden ausgedrückt durch die wirksame Zeilenzahl pro Bildhöhe, nämlich diejenige Zahl der Testvorlage, bei der wir die einzelnen Zeilen eben noch zu trennen vermögen,

nicht durch die als Normwert festgelegte Zahl k von abgetasteten bzw. geschriebenen Zeilen.

Ein zur Klarstellung dieser Beziehungen tauglicher optischer Versuch besteht nach O. H. SCHADE [*28*] im Aufprojizieren des keilförmigen Strichrasters nach Abb. 15 auf eine Fläche von bekannter gleichförmiger Leuchtdichte $\overline{B}$, wobei die Intensität des Projektionslichtes in sehr kleinen Stufen und von geringen

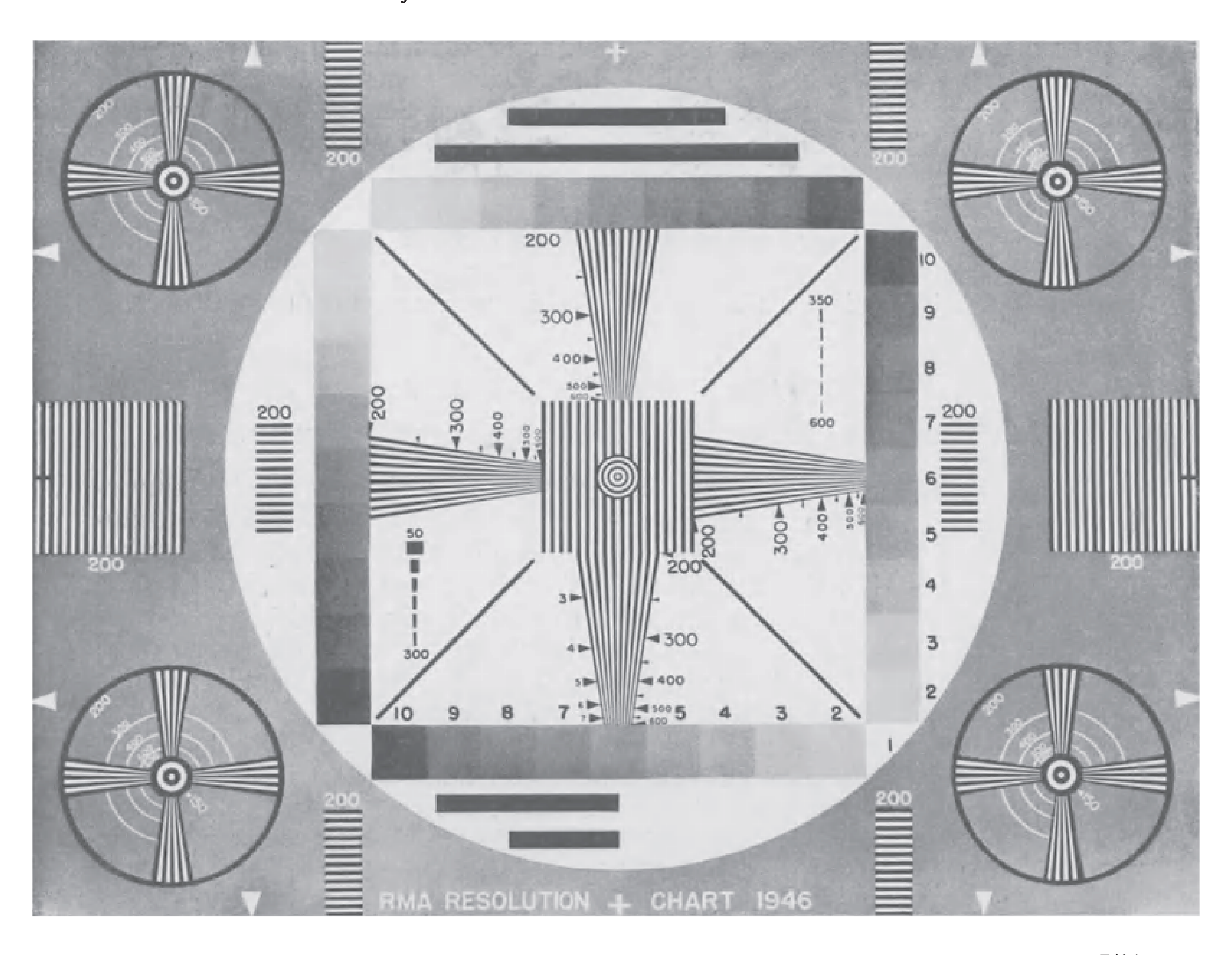


Abb. 14. Bildvorlage der *Radio Manufacturer's Association* (RMA) von 1946, zur Prüfung von Bildschärfe als $f(k)$ in horizontaler und vertikaler Richtung, ferner von Gradation und Geometrie im Fernsehempfangsbild.

Werten ausgehend meßbar gesteigert werden kann. Die Abbildung der schwarzen Rasterlinien ändert $\overline{B}$ nicht, die der lichtdurchlässigen Zwischenräume erhöht $\overline{B}$ um einen bestimmten Betrag ΔB. Bei einer gewissen Differenz ΔB_0 beginnt das Ende des Strichbündels, wo die Teilung am gröbsten ist, sich durch Kontrast der helleren Rasterlinien mit dem weniger hellen Untergrund ($\overline{B}$) abzuzeichnen. Vergrößert man nun schrittweise die Projektionsintensität, so werden durch das Anwachsen des Kontrastes immer feinere Teile des Rasters erkennbar. Hat man so die Auflösung von k' Zeilen erreicht, der ein $\Delta B_{k'}$ zugeordnet sei, so drückt unter Beachtung des WEBER-FECHNERschen Gesetzes, das die Helligkeitsempfindung E dem Logarithmus von B gleichsetzt, das Verhältnis

$$\eta = \log \frac{\overline{B} + \Delta B_0}{\overline{B}} \Big/ \log \frac{\overline{B} + \Delta B_{k'}}{\overline{B}} \tag{II.17}$$

die „Abtastempfindlichkeit" des Auges aus. Setzt man nach SCHADE

$$\frac{\bar{B} + \Delta B_0}{\bar{B}} = C_0 \quad \text{und} \quad \frac{\bar{B} + \Delta B_{k'}}{\bar{B}} = C_{k'}$$

und kann angenommen werden, daß der im WEBER-FECHNERschen Gesetz hinzukommende Faktor über den ganzen Experimentierbereich unveränderlich ist, ferner, daß die $\Delta B < 0{,}1\,\bar{B}$ bleiben, so folgt

$$\eta = \log C_0/\log C_{k'} \simeq \Delta B_0/\Delta B_{k'}. \tag{II.18}$$

Diese Beziehung gilt für $k' \leq 400$ Zeilen, da die Gesamtabweichung ΔB von $\bar{B}$, die zur Erkennbarkeit des 400 Zeilen entsprechenden Details erforderlich ist, bis dahin der Bedingung $\Delta B_{k'} < \bar{B}$ genügt. Durchläuft $\Delta B_{k'}$ einen größeren Bereich, so muß η nach Gl. (II. 17) berechnet werden, immer unter der Voraussetzung, daß $E = f\,(\log \bar{B})$ linear bleibt.

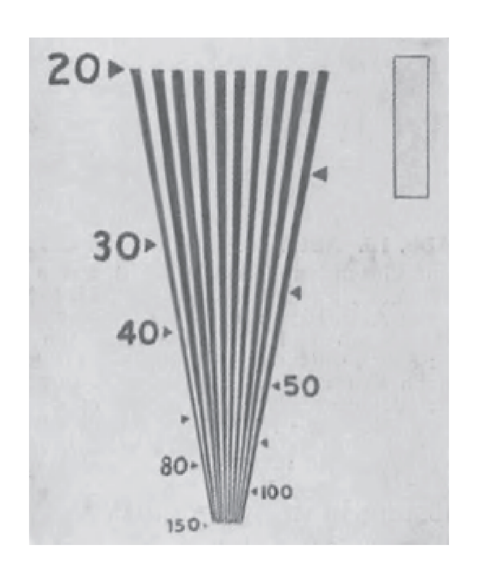


Abb. 15. Bildvorlage der RCA für die Prüfung der Auflösung (Blendeneinflüsse) bei Fernseh-Übertragungsversuchen.

Die Abtastempfindlichkeit des Auges η nimmt also mit wachsender Feinheit der Bildstrukturen ab, weil für deren Auflösung $\Delta B_{k'}$ ständig größer werden muß. Man kann nun fragen, wo η gegen Null geht. Das wird dort der Fall sein, wo der Gesichtswinkel der einzelnen Zeile gegen die Sehschärfe $(1' \cdots 1{,}5')$ konvergiert, also selbst der stärkste Helligkeitssprung von Strich zu Lücke des Rasters keine Trennung mehr ermöglicht. Der für das Auge resultierende Kontrast wird an diesem Punkte Null, wie sehr auch $\Delta B_{k'}$ gegen $\bar{B}$ und gegen ΔB_0 zunehmen mag. Man kann daher schreiben:

$$\eta = \Delta E_{k'}/\Delta E_0, \tag{II.19}$$

wo E die Helligkeitsempfindung mißt. SCHADE fand bei α_0 (Sehschärfe) $\simeq 1'$, ϱ (Betrachtungsabstand : Bildhöhe) $= 4$ und $B = 7$ foot-lambert $\simeq 25 \cdot 10^{-4}$ HK/cm² die Grenze der Auflösung bei $k' \simeq 900$ Zeilen, mit 1% Kontrast. Die mittels Projektion nach vorstehender Beschreibung gewonnenen Werte wurden durch richtige Fernsehübertragung auf dem Schirm einer BRAUNschen Röhre bestätigt, wobei das Einblenden des Testrasters elektrisch geschah und die ΔB durch Messen der Amplitudenänderungen des Bildsignals ermittelt wurden.

Nach SCHADE kann man η durch die Kurve gemäß Abb. 16 darstellen. Der „Effektivwert" von η liegt in der Gegend von ≈ 200 Zeilen ($\varrho = 4$); er hat die Bedeutung eines „Auflösungsvermögens", definiert durch die Abtastschärfe einer Blende, deren lineare Ausdehnung (horizontal und vertikal) unter den angegebenen Verhältnissen so bemessen ist, daß sie beim Überfahren von 200 gleich breiten Maxima und Minima der Helligkeit auf einer Strecke gleich der Bildhöhe ein $\Delta E_{k'}/\Delta E_0$ gleich dem 200 Zeilen entsprechenden Ordinatenwert der Kurve Abb. 16 liefern würde. Der Kontrast von Hell und Dunkel, mit anderen Worten die Erkennbarkeit des 200-Zeilen-Rasters bzw. von Einzelheiten, die dieser Rasterung entsprechen, erführe also noch keine fühlbare Einbuße. Man kann sich vorstellen, daß die Lichtrezeptoren (Zapfen) der Netzhaut untereinander energetisch gekoppelt sind, und zwar in einem Grade, der es ermöglicht, daß

die am Rande einer belichteten Netzhautstelle im Dunkeln liegenden Rezeptoren in der Tiefe von einigen Zapfen noch miterregt werden. Bei $\eta \approx 0{,}5 \cdots 0{,}6$, das ein Maß der Auflösung von 200 Zeilen bzw. von äquivalentem Detail ist, werden ganze Gruppen von Rezeptoren mit gleicher Stärke beleuchtet, und die Kopplung an den Rändern dieser Gruppen macht sich daher noch nicht wesentlich kontrastschwächend bemerkbar. Bei feineren Rasterstrukturen (Bildeinzelheiten) werden die direkt erregten Gruppen kleiner, und schließlich entfallen nurmehr 2 Zapfen auf die Zeilenbreite. Dann tritt die Kopplung wirksam in Erscheinung, und die Beteiligung der angrenzenden Zapfen setzt den Kontrast von Hell und Dunkel entscheidend herab. Man kann diesen Hergang natürlich auch mit der Größe des Zerstreuungskreises der abbildenden Augenöffnung erklären; der Verlauf der Kurven nach Abb. 16 würde dann eine quantitative Aussage über den Radius dieses Zerstreuungskreises ermöglichen.

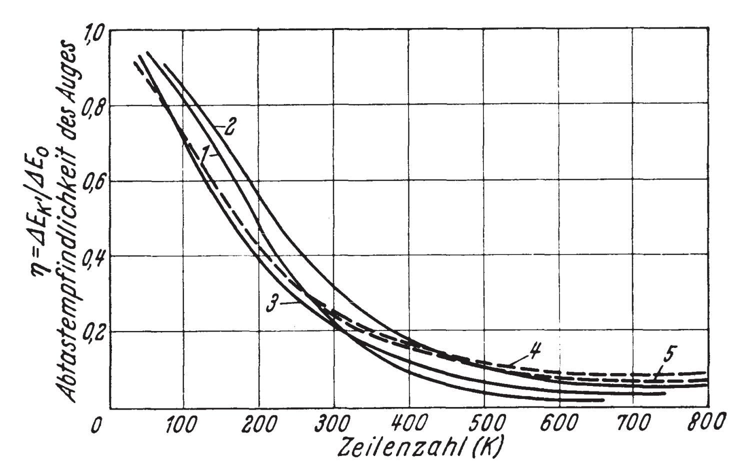


Abb. 16. Abtastempfindlichkeit des Auges als Funktion der aufzulösenden Bildzeilenzahl bei $\varrho = 4$ und $\overline{B} \simeq 25 \cdot 10^{-4}$ HK/cm², nach O. H. SCHADE, II. [*3*]. *1*: projiziertes Raster nach Abb. 15; *2*: dasselbe Raster auf Leuchtschirm einer BRAUNschen Röhre, helle Linien auf dunklem Grund; *3*: desgl. mit dunklen Linien auf hellem Grund; *4* und *5*: nach den Versuchen von P. W. COBB und F. K. MOSS über Schwellwerte der Sichtbarkeit; *4* mit $343 \cdot 10^{-4}$ HK/cm², *5* mit $68{,}6 \cdot 10^{-4}$ HK/cm² Leuchtdichte der belichteten Testfläche.

Nach Abb. 16 geht die Auflösung in der Gegend von $k' = 900$ Zeilen auf 1% herunter, wofür in dem Verhältnis $\% \, C_{k'}/\% \, C_0$, wo $\% \, C = 100 \, \Delta B/\overline{B}$, Werte der Größenordnung 100 erforderlich werden. Man ersieht dies aus Abb. 17, die auch die Kontrastschwelle $C_{k'}$, die für die angegebenen Auflösungen erforderlich ist, aus den Kurven 4 und 5 zu entnehmen gestattet.

8b. Meßmethoden.

Definition und Messung der Übertragungsgüte von Fernsehbildern sind Gegenstand zahlreicher, zum Teil unabgeschlossener Untersuchungen gewesen, deren Methode darin besteht, die vom elektrischen Kanal bewirkten Verschlechterungen mit denen in Vergleich zu setzen, die man bei einer rein optischen Wiedergabe der gleichen Bildvorlage durch meßbare, in ihrer Auswirkung äquivalente Veränderungen im Lichtwege nachbilden kann [*29, 30*]. Man geht dabei meistens von einer hochwertigen Photographie aus, deren maßgebende Parameter wie Korngröße, Kontrastumfang, Gamma nach mikroskopischen, densitometrischen und photometrischen Methoden ermittelt worden sind, und projiziert ein gleichwertiges Diapositiv unter Benutzung einer geeigneten Optik, die jene künstlichen Verschlechterungen in meßbarer Weise vorzunehmen gestattet. Die dabei resultierende Abbildung des Originals auf der Projektionsfläche kann für sich ausgewertet werden, soweit es möglich ist, aus den bekannten Veränderungen im Lichtwege unmittelbar auf die Wirkung der entsprechenden Einbußen im elektrischen Kanal zu schließen und die zulässige Größe dieser Einbußen nach dem visuellen Eindruck direkt festzulegen. So kann z. B. die Auflösung der Bildvorlage durch dosierte Rasterung [*31*], besser durch meßbare Verstellung des Objektivs [*29, 32*] in quantitativ bestimmtem Grade vermindert und die äqui-

valente Zeilenzahl des fernsehmäßig übertragen gedachten Bildes gleicher Unschärfe aus den Rasterdaten bzw. aus der Größe des Zerstreuungskreises des Objektivs ohne weiteres abgeleitet werden. Dieses Verfahren genügt aber nur für eine ungefähre Orientierung über die mindestnotwendige Frequenzdurchlässigkeit des elektrischen Kanals, berechnet aus der Anzahl Bildzeilen, die der

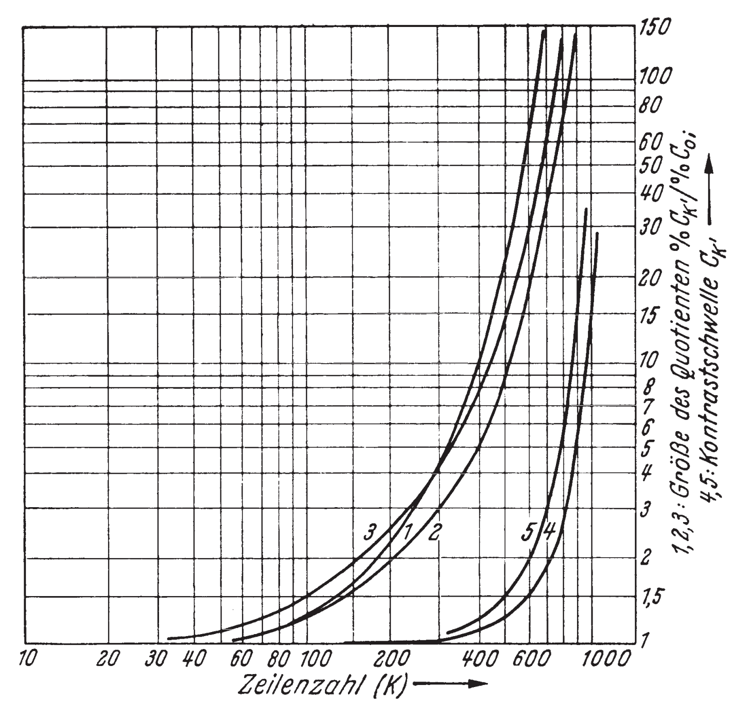


Abb. 17. Kontrastbedingungen für die Sichtbarkeit von Schwarz-Weiß-Rastern. Zusammenhang des Quotienten % $C_{k'}$/% C_0 nach O. H. SCHADE, II. [3] sowie der Kontrastschwelle C_k' mit der aufzulösenden Zeilenzahl. $\varrho = 4$, im Umfeld $\overline{B} \simeq 17 \cdots 24 \cdot 10^{-4}$ HK/cm². *1*: projiziertes Raster nach Abb. 15; *2*: Raster auf Leuchtschirm einer BRAUNschen Röhre, helle Linien auf dunklem Grund; *3*: desgl. mit dunklen Linien auf hellem Grund; *4*: Kontrastschwelle C_k', die bei $\overline{B} \approx 17 \cdot 10^{-4}$ HK/cm² und $C_0 = 1{,}005$ erforderlich ist, *5*: desgl. für $C_0 = 1{,}01$.

eben noch als erträglich empfundenen, gemessenen Verunschärfung des Projektionsbildes entspricht.

Zweckmäßiger verfährt man so, daß ein wirkliches Fernsehbild der Vorlage mit deren direktem optischen Abbild verglichen und letzteres, wie vorstehend angedeutet, in seiner Qualität meßbar soweit reduziert wird, daß es dem Betrachter als dem Fernsehbild gleichwertig erscheint. In den elektrischen Kanal zwischen Fernseh-Bildgeber und -Kontrollempfänger (Monitor) können Mittel eingeschaltet werden, die zusätzliche Störungen von bekanntem Amplitudenverhältnis, wie z. B. Rauschspannungen oder Echos (letztere wichtig bei Kabelübertragungen) beizumischen gestatten oder das Frequenzband durch Filter einzuengen erlauben (s. Anhang). Abb. 18 zeigt eine von P. MERTZ, A. D. FOWLER und H. N. CHRISTOPHER [*32*] benutzte Apparatur der beschriebenen Art für den Vergleich von Projektion und Fernsehbild des gleichen Originals. Maximale Helligkeit und Kontrastumfang werden in beiden Bildern durch Überlagern eines im Projektor abgezweigten Lichtstromes in Übereinstimmung gebracht, wie aus der Darstellung in Abb. 18 ersichtlich; auch der Farbton wird abgeglichen. Die Auswirkung einer gemessenen Verschiebung der Linse des Projektionsobjektivs 1 aus der Lage größter Scharfstellung ist quantitativ bekannt.

Die Durchführung derartiger Untersuchungen ist in zweierlei Weise möglich, nämlich 1. in der Form, daß man auf statistische Gleichheit der visuell empfundenen Bildqualität auf den beiden Schirmen *9* und *10* einregelt, wofür also die Auswertung der Urteile einer ausreichenden Anzahl von Beobachtern erforder-

lich ist. „Gleichheit“ bedeutet dann, daß 50% der Urteile zugunsten des einen und 50% zugunsten des anderen Bildes lauten. Methode 2 beruht darauf, daß man meßbare Güteunterschiede der Wiedergabe eines bestimmten Bildes einstellt, die bewirkten Veränderungen in wechselnder Reihenfolge einer Mehrzahl unvorbereiteter Betrachter darbietet und von diesen die Qualitätsminderung nach einer festgelegten Wertskala abschätzen läßt, die von „nicht wahrnehmbar“

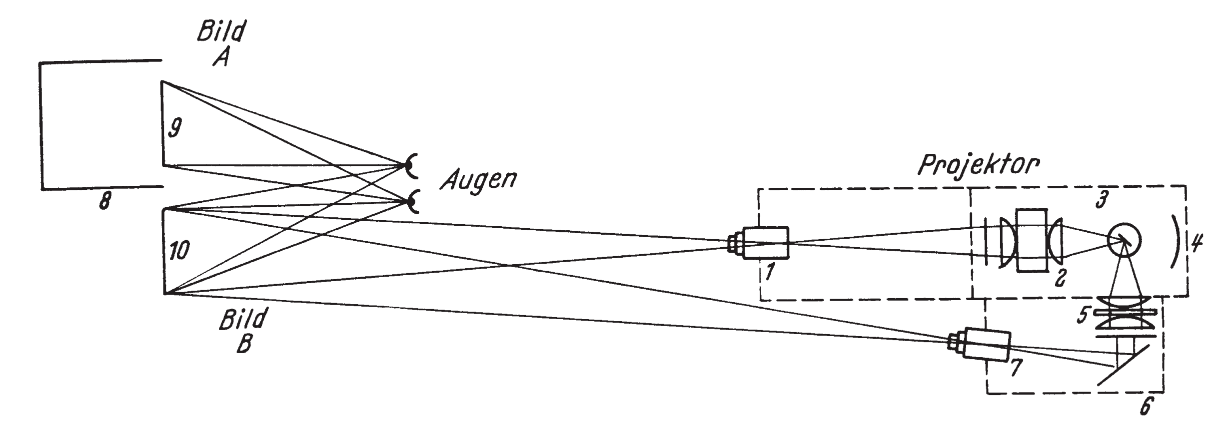


Abb. 18. Vorrichtung nach P. MERTZ, A. D. FOWLER und H. N. CHRISTOPHER, II. [32] für die Bestimmung des Gütegrades von Fernsehbildern durch Vergleich mit rein optischer, meßbar unscharfer Projektion des Originals. *1*: Projektionsobjektiv (1 : 3); *2*: Kondensor mit Wasserfilter und Absorptionsgläsern, davor Diapositiv des Originals, *3*: Lichtquelle; *4*: Reflektor; *5*: Kondensor für Nebenlicht mit Blendrahmen und Schwächungsgläsern; *6*: Umlenkspiegel; *7*: Projektionslinse; *8*: Fernsehbild-Kontrollempfänger; *9*: Fernseh-Bildschirm (Bild A); *10*: Bildschirm der Projektion (Bild B), in der Farbtönung abgeglichen.

bis „Bild unbrauchbar“ genügend feine Abstufungen durchläuft. Die beschriebene Vergleichstechnik gestattet, auf der prozentualen Verteilung der Stimmen, die etwa einer Fehlerkurve folgt, Unterschiedsschwellen („liminal units“) zu begründen, deren Zahl die Überlegenheit des einen oder des anderen Bildes in statistisch sehr sicherer Weise mißt.

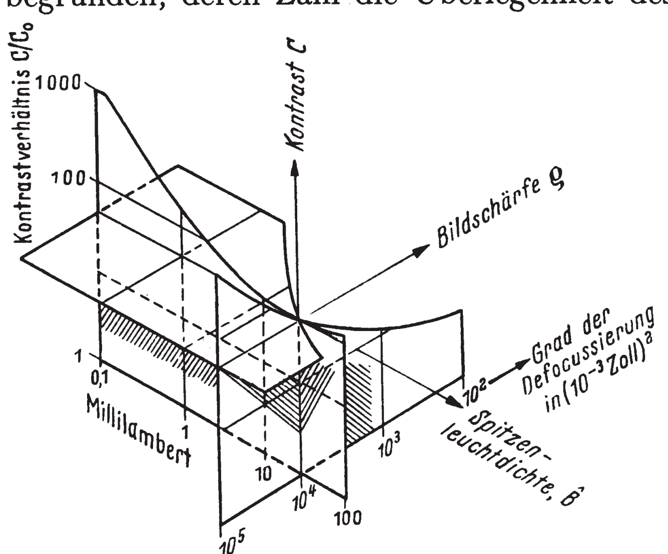


Abb. 19. Darstellung (in drei Ebenen) des Zusammenhanges von Kontrast, Bildschärfe und Maximalleuchtdichte nach P. MERTZ, A. D. FOWLER und H. N. CHRISTOPHER, II. [32]. Kurven konstanter Bildgüte. Abnehmende Werte von ϱ werden durch höhere $\hat{B}$, abnehmende Werte von $\hat{B}$ durch gesteigerte C/C_0 ausgeglichen. Wachsende Unschärfe bedingt stärkeren Kontrast.

Mit Hilfe der Apparatur nach Abb. 18 wurden nicht nur Untersuchungen über den Einfluß von Rauschspannungen und Signalechos auf die Güte des Fernsehbildes durchgeführt (über diese Art von Störungen s. Anhang), sondern auch die Zusammenhänge von Maximalleuchtdichte, Schärfe und Kontrast erforscht. Ein instruktives Ergebnis, das mit den S. 59 erläuterten Beziehungen in Einklang steht, zeigt Abb. 19 in dreidimensionaler Darstellung (1 millilambert $= 3{,}18 \cdot 10^{-4}$ HK/cm²; 1 mil $= 10^{-3}$ Zoll $\simeq 25\,\mu$).

L. C. JESTY und N. R. PHELP [33] haben ebenfalls die statistische Methode der abgestuften Werturteile[1] benutzt, um die bei der Übertragung entstehende Verminderung der Sichtbarkeit von regelmäßigen Strich-

[1] „Nicht sichtbar, gerade eben sichtbar, sichtbar, deutlich sichtbar“.

rastern verschiedenster Teilung, bestehend aus horizontalen oder vertikalen dunklen Linien auf hellerem Grunde, zu prüfen und zur Definition des „Normalbeobachters“ zu gelangen. Für diese Sendevorlagen waren drei verschiedene Werte des Kontrastes zwischen Lücke und Strich normiert, und zwar $C = 21\%$, 44% und 97%. Bezeichnet H_1 die densitometrisch bestimmte Helligkeit des Grundes und H_2 die der dunklen Linien, so ist

$$C = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \cdot 100\%.$$

Lücke und Strich hatten gleiche Breite, und jedes derartige Paar wurde als 1 Testlinie gezählt. Im übertragenen Bilde wurde die maximale Leuchtdichte,

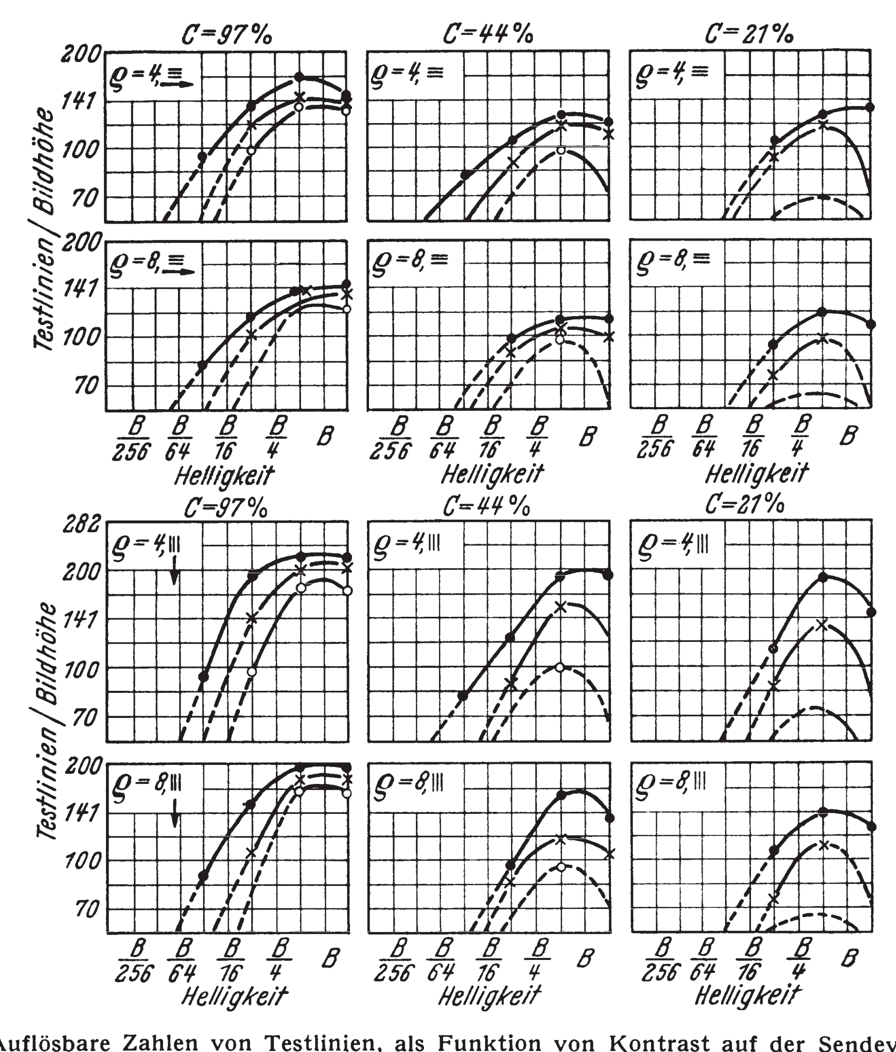


Abb. 20. Auflösbare Zahlen von Testlinien, als Funktion von Kontrast auf der Sendevorlage, max. Leuchtdichte des Empfangsschirmes und ϱ = Betrachtungsabstand : Bildhöhe. Die drei mit Kreuzen, mit vollen oder leeren Kreisen bezeichneten Kurven rühren von drei unabhängigen Beobachtern her. Die oberste Reihe bezieht sich auf horizontale Testlinien und $\varrho = 4$, die zweite auf horizontale Testlinien mit $\varrho = 8$. Untere Reihen: Testlinien vertikal. Übertragung durch Fernsehapparatur, 405 Bildzeilen, Leuchtschirmabtaster und „spot wobbling“ (hochfrequente Querablenkung des Schreiblichtflecks zur Verdeckung der Zeilenstruktur). Nach L. C. JESTY und N. R. PHELP, II. [*33*].

die in einem weiten Bereich veränderlich war, gemessen und $\varrho = 0$, $= 4$ und $= 8$ gewählt, um den Einfluß des Bildwinkels zu untersuchen. Die Vorlagen wurden sowohl bei direktem Sehen, als auch in photographischer Reproduktion auf Platten, sowie als Filmprojektion oder Fernsehbild beurteilt. Der Fernsehkanal war zuvor mittels einer geeigneten Testphotographie von großem Objektumfang auf optimale Wiedergabe eingeregelt (Korrektur der Amplitude/Frequenz- und der Phasenkurve, sowie des Blendeneinflusses und Schirm-Nachleuchtens beim

Leuchtschirm-Filmabtaster). Übertragen wurden 405 oder 625 Zeilen im Zeilensprungverfahren. Die in Kurven dargestellten statistischen Resultate (s. als Beispiel Abb. 20) zeigen die charakteristische Abhängigkeit der Auflösung jener regelmäßigen Strichraster vom Kontrast C, von der Leuchtdichte B und vom Bildwinkel (letzterer bestimmt durch ϱ = Betrachtungsabstand : Bildhöhe). Die Fernsehübertragung liefert die ungünstigsten Werte; beachtlich ist jedoch das starke Eingehen von ϱ (neben B und C) auch beim Filmprojektionsbild. Werden beim Senden der Vorlage mit $C = 97\%$ im Empfangsbild bei $\varrho = 4$ und bei etwa $B = 10^{-2}$ HK/cm² Schirmleuchtdichte längs der Horizontalen beispielsweise 200, längs der Vertikalen rund 165 Testlinien aufgelöst (Abb. 20), analysiert also das Auge 200 bzw. 165 Schwarz-Weiß-Wechsel je Zeilenlänge bzw. Bildhöhe, so würde

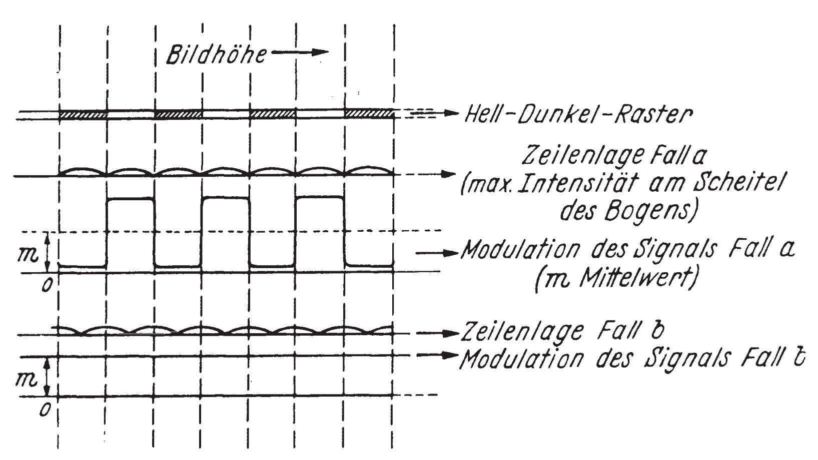


Abb. 21. Grenze für Kontrastübertragung nahe der Auflösungsgrenze, in Funktion der Relativlage von Hell-Dunkel-Strichvorlage und Abtastzeilenraster.

ein schachbrettartiges Muster von $2 \cdot 200 \cdot 2 \cdot 165 = 132000$ Bildelementen, das im Original den angegebenen Kontrast zwischen den hellen und den dunklen Feldern besäße, gerade noch als differenziertes Mosaik wahrgenommen werden, während größere Feinheiten nicht mehr sichtbar wären.

Bei 200 horizontalen Testlinien pro Bildhöhe und einem Fernsehraster von abgerundet 400 Abtastzeilen würde auf jeden dunklen Strich wie auch auf jede helle Lücke der Rastervorlage je 1 Abtastzeile kommen, da Strich und Lücke gleich breit sind und zusammen 1 Testlinie bedeuten. Es können darum alle möglichen Übergänge vom günstigsten Fall gemäß Abb. 21a nach dem Extrem Abb. 21b eintreten, wo infolge der dort angenommenen Relativlage des Abtastzeilenrasters zum Testraster die Modulation des ersteren in vertikaler Richtung vollkommen herausgemittelt und die Sichtbarkeit der Linienstruktur des Testrasters Null wird. Man versteht, daß damit der übertragene Kontrast gleichfalls gegen Null geht. Bei weniger als 200 Testlinien ist dies aber nicht mehr möglich; die Größe von C fängt dann an, eine Rolle zu spielen, und die Vorlage rückt in den Bereich der Wahrnehmbarkeit.

9a. Physiologische Grundlagen des Farbfernsehens.

Um die im Gesichtsfeld der Sendekamera abgetasteten Bildelemente in ihrer natürlichen Farbe zu übertragen, muß man diese spektral *analysieren* und das Ergebnis in elektrischen Signalen ausdrücken, die auf dem Empfangsschirm in Phase mit der geberseitigen Farbanalyse die Farb*synthese* des synchron aufgebauten Bildpunktrasters steuern. Analog der in der Buntdrucktechnik und beim Farb*film* üblichen Methode werden durch $m \gtrless 2$ spektral abgestufte optische Bandfilter, deren Durchlaßbereiche komplementär sind, d. h. sich zu weiß ergänzen,

„Farbauszüge“ hergestellt und durch den lichtelektrischen Effekt beim Abtasten der Bildelemente in entsprechende Stromamplituden übersetzt. Diese können

1. weißes Licht, z. B. die Emission des Empfangsschirmes einer BRAUNschen Röhre mit geeignetem Leuchtphosphor, in seiner momentanen Intensität modulieren, während das Bildfeld durch Farbfilter hindurch betrachtet oder projiziert wird, die den senderseits benutzten gleich sind und in Phase mit ihnen wechseln („Sequential“-Verfahren);

2. unter Inanspruchnahme von $m \gtrless 2$ elektrischen Kanälen ebenso viele, in der Verteilung ihrer Emission den Filterbereichen angepaßte Farblichtquellen gleichzeitig so steuern, daß deren Aufhellungsverhältnis die zu übertragende Farbtönung durch Mischung direkt ergibt. Ein in kleinsten Flächenelementen mit Leuchtphosphoren verschiedener Lichtfarbe regelmäßig abwechselnd bedruckter Schirm, den $m \gtrless 2$ Kathodenstrahlen erregen, und zwar jeder stets nur in einer und derselben Farbe, stellt eine moderne Lösung dieses Problems dar („Simultaneous“-Verfahren).

Das Ausfiltern der Farbauszüge aus weißem Licht nach 1. ist eine „subtraktive“ Methode; ihre Helligkeitsverluste durch Absorption der nicht durchzulassenden Strahlen sind beträchtlich und müssen durch Steigerung der Intensität (bzw. der senderseitigen Empfindlichkeit) ausgeglichen werden. Hingegen gehört das Zusammensetzen getrennt gesteuerter Farblichtströme nach 2. zu den „additiven“ Methoden; diese liefern hellere Bilder, erfordern aber ein weniger einfaches Übertragungssystem.

Für das Verhalten unseres Gesichtssinnes bei Farbfernsehen sind bestimmend:

a) statische Fähigkeiten, z. B. die Beziehung zwischen Helligkeitsempfindung und Lichtwellenlänge (wie für das energiegleiche Spektrum in Abb. 3 wiedergegeben), das Entstehen der Mischfarben, das Unterscheidungsvermögen für Farbnuancen und Sättigungsgrade von Farben; der Gang der Sehschärfe mit der Wellenlänge;

b) dynamische Fähigkeiten, beispielsweise die Reaktion auf Wechsellicht verschiedener Farbe und Frequenz, das Bestehen einer Flimmergrenze in Abhängigkeit von der Intensität des farbigen Lichtes.

Wir müssen, um diese Eigentümlichkeiten des Gesichtssinnes besser zu verstehen, auf einige Grundelemente der Farbempfindung des Auges und auf die einschlägigen Gebiete der Farbenlehre zurückgreifen.

9b. Statische Fähigkeiten der Farbempfindung.

Die Grenzen des sichtbaren Spektrums liegen am roten Ende bei etwa $7 \cdot 10^{-5}$ cm, am blauen bei etwa $4 \cdot 10^{-5}$ cm, jedoch wird der Bereich zwischen $6 \cdot 10^{-5}$ cm und $7 \cdot 10^{-5}$ cm nur bei genügender Beleuchtungsstärke, also bei Zapfensehen, wahrgenommen. In der Dämmerung, d. h. beim Übergang zum Stäbchensehen (PURKINJE-Effekt) ist das Auge dafür unempfindlich. Nach der YOUNG-HELMHOLTZschen Theorie des Farbensehens, auf deren Einzelheiten und spätere Wandlungen hier nicht eingegangen werden kann, erregt das Licht auf der Netzhaut drei verschieden geartete Rezeptoren, Vermittler von drei sogenannten „Grundempfindungen“, deren relative Stärken den resultierenden Farbeindruck bestimmen. Diese Auffassung hat zuerst C. MAXWELL zur Darstellung sämtlicher theoretisch möglichen Farben durch das Farbdreieck geführt. Einzelerregung jedes der drei Rezeptoren ergibt eine „Grundfarbe“, gleichzeitige Erregung verschiedenartiger Rezeptoren eine „Mischfarbe“. Die Empfindung der Grundfarben wird nicht etwa nur durch eine ganz bestimmte Schwingungszahl des Lichtes (resonanzähnlich) ausgelöst, sondern durch einen ziemlich breiten

Bereich des Spektrums. Nach der Theorie variiert dabei lediglich die Quantität der Erregung, der resultierende Farbton bleibt jedoch der gleiche. Es ist nicht bewiesen, wenn auch wahrscheinlich, daß die drei visuell empfundenen Grundfarben reell sind, d. h. daß sie nach Frequenz und Sättigung mit definierten schmalen Streifen des Spektrums identifiziert werden können. Klar ist jedoch, daß alle überhaupt herstellbaren Farben, auch die Spektralfarben, durch dosierte Mischung aus den Grundempfindungen, die uns die drei Arten von Rezeptoren der Netzhaut vermitteln, aufgebaut sein müssen.

Man nimmt zweckmäßigerweise an, daß beim Eindruck von *Weiß* (entsprechend der Zusammensetzung der Strahlung des schwarzen Körpers bei etwa 5500° abs. T.) die Intensität der drei Grundempfindungen gleich groß ist. Der Übergang von Weiß zu farbigem Licht bedeutet dann, daß die relative Erregungsstärke jener 3 Empfindungen sich verändert. Für jede Spektralfarbe und jede durch Mischen von Spektralfarben hervorgerufene reelle Farbe (z. B. Purpur) läßt sich jenes Verhältnis quantitativ ausdrücken, wenn das wie vorstehend definierte Weiß als additives Gemisch dreier bekannter, durch die Wellenlänge bestimmter Komponenten dargestellt werden kann. Das ist nun im Prinzip in sehr verschiedener Weise möglich, da Weiß sich aus unendlich vielen Farbtripeln zusammensetzen läßt, die sämtlich die gleiche resultierende Empfindung erzeugen. (Ebenso gilt, daß jeder andere Farbreiz durch dosiertes Mischen dreier voneinander unabhängiger und beliebig wählbarer Reizarten für das Auge unterschiedslos nachgebildet werden kann. Die einzige Bedingung dafür ist, daß keiner dieser sogenannten „Eichreize“ aus den beiden anderen ermischbar sein darf).

Auch aus *zwei* komplementären Komponenten ist Weiß herstellbar. Denken wir uns auf eine jede Lichtart gleichmäßig gut reflektierende Fläche blaues und gelbes Licht in einem regelbaren Intensitätsverhältnis geworfen, so resultiert, je nach diesem Verhältniswert, eine gelbliche oder bläuliche Farbe, und der Übergang vom einen zum anderen Eindruck führt über die Empfindung eines „subjektiven“ Weiß.

Die gewöhnliche Darstellung nach MAXWELL-HELMHOLTZ beruht auf den idealen Grundfarben Rot, Grün, Blau, die in einem gleichseitigen Dreieck die Eckpunkte einnehmen (Abb. 22, X, Y, Z entsprechend Rot, Grün, Blau). Der Weißpunkt W liegt im Mittelpunkt. Er hat also von allen Dreieckseiten gleichen Abstand, und dies bedeutet eben Gleichheit der Erregungsstärke der drei Grundempfindungen. Auf der gekrümmten Linie sind die Wellenlängen einiger Spektralfarben in ÅNGSTRÖM-Einheiten eingetragen. Zwischen dieser Linie und der von r nach v laufenden Geraden, die man die Purpurlinie nennt, sind die unter *normalen* Sehbedingungen realisierbaren Farben eingeschlossen. Je näher ein Farbton an der dargestellten Umgrenzung liegt, desto „gesättigter“ ist er. Demgemäß zeigen die Spektralfarben und die durch Mischung des äußersten Rot und Violett entstehenden Purpurtöne die höchste Sättigung. Sämtliche anderen, weniger gesättigten Farbreize gehen aus diesen Grenzfarben durch Hinzumischen von Weiß hervor. Bei partieller Ermüdung der beiden anderen Grundempfindungen können allerdings gesättigtere Farben, als die Spektralfarben, z. B. im Grün, zustande kommen; das sind dann aber keine normalen Sehbedingungen mehr.

Der Farbeindruck einer durch die Abstände von den Geraden XY, YZ, XZ in Abb. 22 bestimmten Tönung ist nur dann eindeutig, wenn die gefärbte Fläche in strahlungsloser Umgebung betrachtet wird. Farben, die nicht im Farbdreieck enthalten sind, gibt es nicht; aber es können durch Kontrast mit helleren oder dunkleren Umfeldern aus *psychologischer* Ursache Empfindungen resultieren, die nicht durch Farbton und Sättigung charakterisierbar sind. Beispielsweise sieht eine gelbrote Fläche geringer Leuchtdichte in heller weißer Umrahmung braun aus.

Wir müssen uns darüber im Klaren sein, daß hier nicht die Rede ist von der erborgten Farbe pigmentüberzogener Objekte. Für die Synthese des farbigen Fernsehbildes kommen nur solche Lichtquellen in Betracht, die entweder selber spektral selektiv emittieren oder weiß leuchten, so daß daraus die gewünschten Bereiche ausgefiltert werden können.

9c. Kolorimetrie.

Um einen Farbreiz quantitativ zu kennzeichnen, hat man zwei Möglichkeiten. Man gibt entweder die relativen Werte der drei Grundempfindungen an (dafür genügen zwei Zahlen, da die Summe aller dreier stets 1 sein muß) oder Farbton

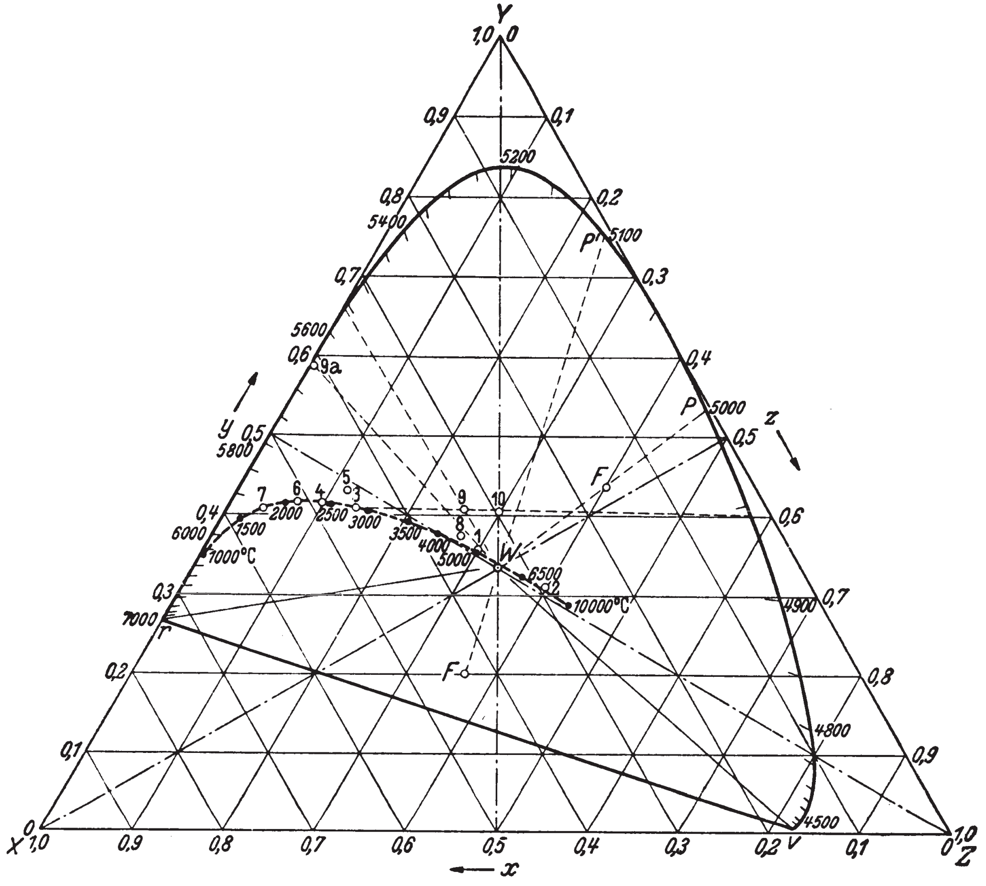


Abb. 22. Normal-Farbdreieck. W = Farbort des energiegleichen Spektrums = Weißpunkt. Die gekrümmte Linie gibt die Farborte der Spektralfarben an, die Gerade $r - v$ die Purpurlinie. Der Kurvenzug mit den angeschriebenen Temperaturen enthält die Farborte der schwarzen Strahlung. Farborte, *1*: Tageslicht; *2*: blauer Himmel; *3*: gasgefüllte Glühlampe; *4*: Vakuumglühlampe; *5*: Gasglühlicht; *6*: Kohlefadenlampe; *7*: Petroleumlampe; *8*: Tageslichtglühlampe; *9*: gew. Quecksilberdampflampe; *10*: Quecksilberdampf-Höchstdrucklampe. Wellenlänge in Ångström-Einheiten.

und Sättigung. Im ersten Falle findet man den Farbpunkt (F in Abb. 22) durch Abtragen der Grundempfindungswerte auf den drei entsprechenden Ordinatenlinien (Normalen auf den Dreiecksseiten). Im zweiten Falle liegt der gesuchte Punkt (F) auf der Verbindungslinie der als Farbton bezeichneten Spektralfarbe (Punkt P) mit dem Weißpunkt an derjenigen Stelle, für die das Verhältnis der Strecken FW/PW gleich dem angegebenen Sättigungswert ist. Umgekehrt zeigt, wenn wir vom Farbreiz F ausgehen, die Verbindungsgerade WF mit ihrer Verlängerung auf die zur Charakterisierung dieses Farbreizes dienende farbtongleiche Wellenlänge des Spektrums λ_F, hier = 5000 Ångström-Einheiten.

Nach der Darstellung in Abb. 22 muß die Mischung zweier Farben, deren Orte im Dreieck bestimmt sind, auf der Verbindungsgeraden dieser Orte liegen.

Es leuchtet ein, daß damit auch die Möglichkeiten eines Zweifarben-Fernsehens theoretisch außerordentlich beschränkt sind. Trotzdem hat man in der Praxis bei Filmen, deren Farbskala sich durch Ermischen aus den Komponenten Orange und Blaugrün ergibt, den Eindruck eines ziemlich weiten Farbumfanges. Teilweise dürften dabei Ermüdungskontraste im Auge mitwirken. Es ist ja bekannt, daß eine weiße Fläche, mit stark gefärbtem Licht bestrahlt, nach dessen Unterbrechung in der komplementären Farbe erscheint. Die spektrale Breite der Licht*empfindung* kann dadurch rein physiologisch erweitert werden, so daß beispielsweise im Kontrast zu intensivem Gelbgrün ein objektiv nicht vorhandenes violettstichiges Blau vorgetäuscht wird. Ferner tritt nach J. ROSEMANN der sehr wichtige Umstand hinzu, daß die Mischung einer gesättigten Farbe mit Weiß im Auge Werte liefern kann, die keine Gerade vom Farbort zum Weißpunkt bilden; man erhält vielmehr eine gekrümmte Linie und kann so mit den oben angegebenen Komponenten einem reinen Gelb nahekommen [*34*].

Damit Orange und Blaugrün gemischt Weiß erzeugen, ist es nur erforderlich, die beiden Farbreize so zu wählen, daß ihre Verbindungsgerade durch den Weißpunkt geht. Das ist, wie man sieht, innerhalb eines ziemlich breiten Spielraumes möglich.

Handelt es sich um drei Komponenten, sind also drei Farbreize gegeben, so befinden sich die Orte ihrer Mischfarben sämtlich auf der von den Verbindungsgeraden der drei Farbpunkte umrandeten Dreiecksfläche. Das ergibt dann die Möglichkeit, alle natürlichen Farben darzustellen, indem man die Komponenten zueinander passend wählt.

Um der Kolorimetrie eine einheitliche Grundlage zu geben und die Definition von Farben international eindeutig zu machen, hat man für die Eckpunkte des Dreiecks nach Abb. 22 bestimmte Grundfarben oder „Eichreize" festgelegt. Dies geschah seitens der Internationalen Beleuchtungs-Kommission (IBK) auf Grund der Arbeiten von J. GUILD [*35*] und W. D. WRIGHT [*36*], auf die wir sogleich zurückkommen.

Vorausgeschickt sei Folgendes: Ein Farbreiz besitzt grundsätzlich zwei Eigenschaften, Reizart und Reizstärke. Die Reizart ist durch den Farbort im Dreieck, die Reizstärke durch die Leuchtdichte der Reizquelle bestimmt, sofern keine Ermüdungs- oder Sättigungserscheinungen mitwirken. Photometrisch gleiche Reizstärke kann durch völlig verschiedene Reizarten erzeugt werden (vgl. Kurve Abb. 3), andererseits liefert eine Lichtquelle, deren spektrale Intensitätsverteilung bei Variation der Strahlungsleistung konstant bleibt, veränderliche Reizstärke bei unveränderter Reizart. Um neben der Reizart ergänzend die Reizstärke anzugeben, ist eine dreidimensionale Darstellung zweckmäßig. Da hierbei nur zwei Koordinaten zur Kennzeichnung des Farbortes, d. h. der Art des Farbreizes, in Anspruch genommen zu werden brauchen, weil die Summe der Verhältniswerte im Farbdreieck $= 1$ ist, kann man die dritte Raumkoordinate zur Messung der Reizstärke (durch die Leuchtdichte) benutzen. In der modernen Farbmetrik sind dreidimensionale Farbenräume gebräuchlich; doch können wir darauf hier nur kurz eingehen. Sehr anschaulich pflegt man dort Farbe und Helligkeit in der dreidimensionalen Form darzustellen. Der Leuchtdichteanteil der Grundfarben Rot, Grün und Blau werde auf den Achsen x, y, z eines rechtwinkligen Koordinatensystems aufgetragen. Damit ist der so bestimmte Punkt im Raum nicht nur nach Farbton und -sättigung, sondern auch nach Helligkeit definiert. Orte gleicher Helligkeit sind solche, für die $x + y + z =$ const. ist. Diese Bedingung wird erfüllt auf Ebenen, die alle drei Achsen unter 45° schneiden. Der Schwerpunkt einer solchen Dreiecksfläche ist der Weißpunkt und die Summe der Leuchtdichteanteile $B_x + B_y + B_z$ liefert direkt ein Maß der Helligkeit. Dieser Wert

wird beim NTSC-Farbfernseh-System gesondert als „Luminanz" übertragen, während Farbton und -sättigung („Chrominanz") durch gleichzeitige Phasen- und Amplitudenmodulation einer Hilfsträgerfrequenz wiedergegeben werden. Längs anderer Farbgeraden, die nicht durch den Weißpunkt gehen, bleibt die Chrominanz konstant und ändert sich lediglich die Helligkeit der durch die räumliche Lage dieser Geraden definierten Farbe.

Guild und Wright haben bei den erwähnten Untersuchungen als Eichreize die Spektrallinien 7000, 5461 und 4358 ÅE gewählt. Ihre Messungen wurden von der IBK als Grundlage anerkannt, um daraus durch eine Transformation, die ein rein positives Wertesystem[1] liefert, das für das Normalauge passende Farbdreieck nach Abb. 22 abzuleiten, dessen Eckpunkte ein fiktives Farbtripel darstellen. Zur Bestimmung des Ortes einer Spektralfarbe in diesem Dreieck wurden die sogenannten Normalreiz*beträge* $x, y\ z$ berechnet, deren Gang mit der Wellenlänge λ durch die drei Kurven in Abb. 23 wiedergegeben ist. Diese Kurven beziehen sich auf gleiche Strahlungsleistung bei jeder Wellenlänge, d. h. auf ein „energiegleiches" Spektrum. Bedeutet also $S(\lambda)$ die in dem unendlich schmalen Bereich zwischen λ und $\lambda + d\lambda$ emittierte Leistung, so ist für die richtige Ermischung einer Spektralfarbe aus den drei angenommenen Grundfarben Voraussetzung, daß $S(\lambda)$ im ganzen sichtbaren Spektrum konstant bleibt. Unter dieser Bedingung geben die Ordinaten in Abb. 23 an, in welchem numerischen Verhältnis die Strahlungseinheit auf die Aussendung der drei $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ zugeordneten Normallichtreize (Rot, Grün, Blau) zu verteilen ist, um die dem auf der Abszissenachse gewählten λ entsprechende Spektralfarbe zu erhalten. Dabei wurden $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ so bestimmt, daß die *integralen* Reizbeträge, d. h. die Kurveninhalte, der drei Grundfarben gleich sind:

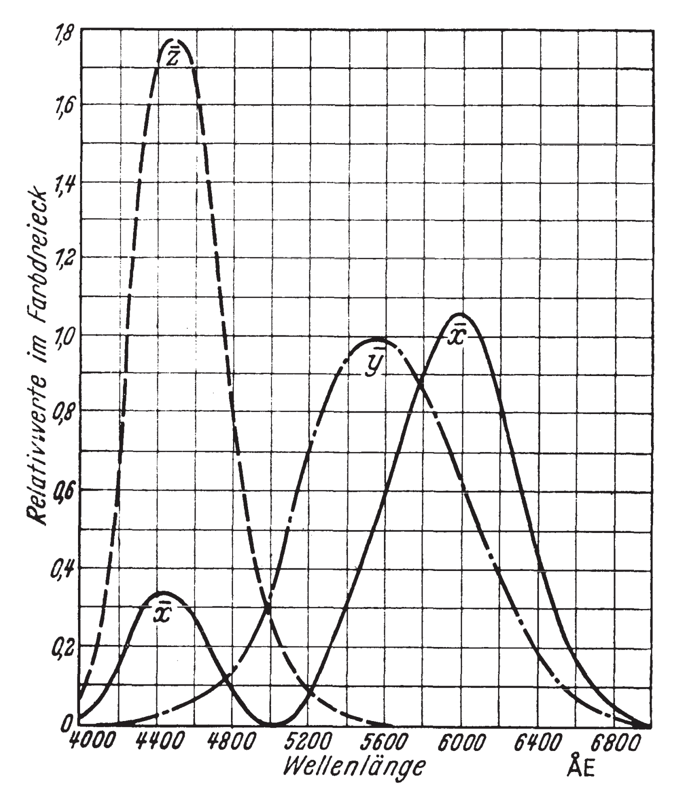


Abb. 23. Kurven der Normalreizbeträge $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$, die zur Ermischung der Spektralfarben aus den von der Internationalen Beleuchtungskommission anerkannten Normalfarbreizen (Rot, Grün, Blau) für ein energiegleiches Spektrum erforderlich sind.

$$\int \bar{x}(\lambda)\, d\lambda = \int \bar{y}(\lambda)\, d\lambda = \int \bar{z}(\lambda)\, d\lambda. \qquad \text{(II.20)}$$

Die Integration wird über die ganze Ausdehnung des sichtbaren Spektrums erstreckt, in der kolorimetrischen Praxis von 4000 ÅE bis 7000 ÅE.

Ist für die Farbbestimmung einer beliebigen Lichtquelle die spektrale Energieverteilung $S(\lambda)$ bekannt, so berechnet man die Integrale

$$X = \int_{4000}^{7000} S(\lambda)\, \bar{x}(\lambda)\, d\lambda;\quad Y = \int_{4000}^{7000} S(\lambda)\, \bar{y}(\lambda)\, d\lambda;\quad Z = \int_{4000}^{7000} S(\lambda)\, \bar{z}(\lambda)\, d\lambda \qquad \text{(II.21)}$$

[1] Bei unzweckmäßig gewählten Eichreizen könnten bestimmte Farben in der additiven Metrik nur durch Zuhilfenahme eines „negativen" Eichreizbetrages dargestellt werden.

und bildet daraus die Normalreizanteile („trichromatic coefficients")

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}\,;\quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}\,;\quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}\,, \tag{II.22}$$

deren Summe 1 ist. Für gewöhnlich geht man dazu auf dem Wege der numerischen Integration vor, wobei Schritte von $\Delta\lambda = 100$ ÅE üblich sind, so daß z. B.

$$x = \sum_{4000}^{7000} S(\lambda)\,\bar{x}(\lambda)\,\Delta\lambda = S(\lambda_1)\,\bar{x}(\lambda_1)\,\Delta\lambda + S(\lambda_2)\,\bar{x}(\lambda_2)\,\Delta\lambda + \cdots + S(\lambda_n)\,\bar{x}(\lambda_n)\,\Delta\lambda \tag{II.23}$$

mit $\lambda_1 = 4000$ ÅE, $\lambda_n = 7000$ ÅE und $\Delta\lambda = 100$ ÅE. Die Normalreizanteile sind die Koordinaten der gemessenen Farbe im Normaldreieck.

Die Auswahl der Eichreize ist so getroffen, daß ihre Mischung bei gleicher Strahlungsleistung Weiß erzeugt. Wenn man im Normaldreieck für den Weißpunkt W die Helligkeit 1 annimmt, so gibt

$$Y = \int S(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda$$

die auf 1 bezogene „Helligkeit" der gemessenen Farbe an. Dies rührt daher, daß die Kurve für $\bar{y}$ (Abb. 23) dem Verlauf der Helligkeitsempfindlichkeit $\eta(\lambda)$ des Auges (vgl. Abb. 3) gleichgesetzt worden ist. Die photometrische Helligkeit einer Strahlung ist $H = \int S(\lambda)\,\eta(\lambda)\,d\lambda$ und demnach

$$\int S(\lambda)\,\eta(\lambda)\,d\lambda = \int S(\lambda)\,\bar{y}(\lambda)\,d\lambda = \frac{Y}{X+Y+Z} = Y. \tag{II.24}$$

Die Benutzung der Kurven nach Abb. 23 sei durch ein Zahlenbeispiel erläutert: Um die Dreieckskoordinaten x, y, z für grünes Licht von $\lambda = 5200$ ÅE zu finden, entnehmen wir aus Abb. 23 die Angaben

$$\bar{x} = 0{,}06,\quad \bar{y} = 0{,}71,\quad \bar{z} = 0{,}08.$$

Zur graphischen Darstellung in Verhältniswerten bilden wir:

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x}+\bar{y}+\bar{z}}\,;\quad y = \frac{\bar{y}}{\bar{x}+\bar{y}+\bar{z}}\,;\quad z = \frac{\bar{z}}{\bar{x}+\bar{y}+\bar{z}}$$

mit $x + y + z = 1$, so daß zwei Zahlen genügen. Daher:

$$x = \frac{0{,}06}{0{,}85}\,;\quad y = \frac{0{,}71}{0{,}85}\,;\quad \left[z = \frac{0{,}08}{0{,}85}\right]$$

folglich:

$$x \simeq 0{,}07;\quad y \simeq 0{,}83;\quad [z \simeq 0{,}1].$$

Vorstehendem Verfahren entsprechend können wir das Normaldreieck nach Abb. 22 durch ein rechtwinkliges Dreieck nach Abb. 24 ersetzen. Diese einfachere Darstellung wird erhalten, indem man die beschriebene Rechnung mit Hilfe der Normalreizbeträge für das ganze sichtbare Spektrum durchführt. Darin sind dann x, y durch die Normalreizanteile gegeben. Jeder Punkt des Farbigkeitsdiagramms nach Abb. 24 definiert den Farbreiz unabhängig von seiner Helligkeit. Abgesehen von der Transformation der Koordinaten gilt für das rechtwinklige Farbdreieck dasselbe wie für das gleichseitige nach Abb. 22; die realen Farben sind wiederum zwischen der gekrümmten Linie der Spektralfarben und der Purpurgeraden eingeschlossen. Die (nach wie vor fiktiven) Grundfarben Rot, Grün, Blau an den Eckpunkten haben die Koordinaten $x = 1$, $y = 0$, bzw. $x = 0$, $y = 1$, bzw. $x = 0$, $y = 0$. Das Weiß einer Lichtquelle mit energiegleichem Spektrum hat die Koordinaten $x = 0{,}3333$ und $y = 0{,}3333$. Die Wahl fiktiver Grundfarben ermöglichte die Darstellung aller vorkommenden Farbreize durch *positive* Zahlen. Zieht man durch den Ort einer definierten Farbe

eine Gerade, so gibt es auf ihr jenseits dieses Ortes eine beliebige Zahl anderer, die mit ebenso vielen diesseitigen zu Paaren konjugiert die gleiche Farbe durch Mischung hervorbringen können.

An der Grenze zwischen verschiedenen Farben empfindet das menschliche Auge den Übergang als um so schärfer, je größer die Helligkeitsdifferenz beider Reize ist und je mehr sich das Farbenpaar dem komplementären Verhalten nähert.

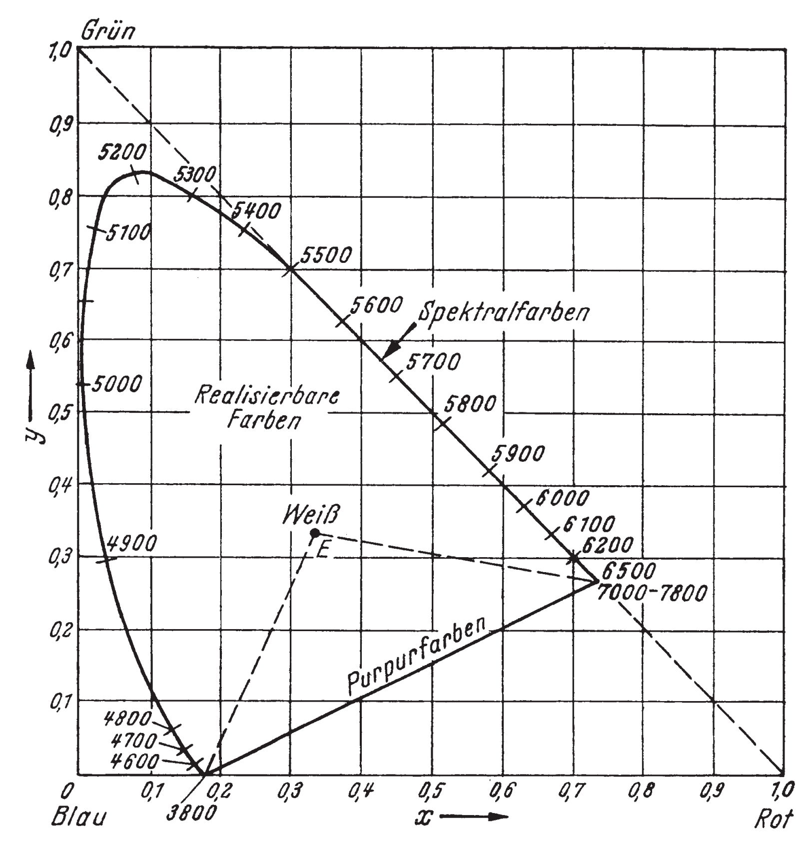


Abb. 24. Vereinfachtes Farbdreieck der Internationalen Beleuchtungskommission. Die gekrümmte Linie enthält wiederum (vgl. Abb. 22) die Spektralfarben in Ångström-Einheiten, die gerade Linie die Purpurfarben.

Eine schwarz-weiße und eine schwarz-grüne Sprungstelle erscheinen unter der Bedingung, daß die weiße und die grüne Fläche gleiche photometrische Helligkeit besitzen, aus einer und derselben Entfernung als praktisch äquivalent in bezug auf die Übergangsschärfe. Anders verhält es sich mit Rot und Blau. Das visuelle Auflösungsvermögen ist nach Messungen der RCA [37] für schwarz-rote Kanten wenig, für schwarz-blaue erheblich geringer als für schwarz-weiße oder schwarz-grüne. Der Nachweis wurde mittels einer sinnreichen optischen Testvorrichtung statistisch geführt (4 Versuchspersonen). Sie gestattete, die Sichtbarkeitsverhältnisse nachgeahmter Einschwingkanten für die Übergänge Schwarz-Weiß, Schwarz-Farbe und Farbe-Farbe zu prüfen, und führte zu dem in der Tab. 2 zusammengefaßten Ergebnis.

Tabelle 2.

Farbwechsel	Helligkeit in % (Weiß = je 100 % Rot, Grün und Blau)	Sehschärfe %
Weiß—Schwarz	Weiß = 100%	100
Grün—Schwarz	Grün = 100%	94
Rot—Schwarz	Rot = 100%	90
Blau—Schwarz	Blau = 100%	26
Grün—Rot	Rot = 100%, Grün = 43%	40
Grün—Blau	Blau = 100%, Grün = 3,3%	19
Rot—Blau	Blau = 100%, Rot = 6,3%	23

Diese von anderer Seite [*38*] zum Teil bestrittenen Ergebnisse bilden die Grundlage des „Mixed Highs"-Farbfernsehsystems der RCA. Die scheinbar bestätigte geringere Sehschärfe im Blau wirkt sich nämlich im Frequenzbandbedarf wie folgt aus: Stellt man sich vor, daß bei einem bestimmten Betrachtungsabstand vom Bildschirm das Rot- und das Grünbild gerade den verlangten Auflösungsgrad erreichen, und denkt man sich den Blauauszug mit dem gleichen Frequenzband Δf wie Rot und Grün übertragen, so wäre dies Verschwendung; denn das Auge könnte die dank Δf objektiv vorhandene Übergangsschärfe im Blaubild gar nicht ausnutzen[1]. Was für Helligkeitssprünge gleichbleibender Farbe im Blau gilt, ist aber nach Tab. 2 ebenfalls für den Einschwingvorgang von einer Farbe zur anderen maßgebend, denn auch diesen löst das Auge merklich schlechter auf, als den äquivalenten Schwarz-Weiß-Sprung. Die Konsequenz war das Mixed-Highs-Verfahren: Beschränkung des im Rot- und im Blaukanal übertragenen Δf auf 2 MHz und die Superposition des Gemisches der nur Helligkeitsdifferenzen, aber keine Farbkontraste mehr vermittelnden Frequenzen zwischen 2 MHz und 4 MHz im Grünkanal, dessen Ausgang über ein Hochpaßfilter die feineren Strukturen im Rotbild mitsteuert. Ein Schwarz-Weiß-Empfänger kann somit das Frequenzband des Grünkanals verwerten, ohne daß seine Auflösung unter den 4 MHz entsprechenden Grad sinkt („compatibility").

[1] Y. LE GRAND bestätigt, daß die Sehschärfe für Farbübergänge geringer ist, als für Helligkeitsübergänge vergleichbarer Steilheit. Er findet aber keinen Anhaltspunkt für ein kleineres Auflösungsvermögen des Auges im Blau und zitiert Messungen, die im Gegenteil beweisen, daß die Sehschärfe im ganzen sichtbaren Spektrum konstant ist. Den abweichenden Befund von A. V. BEDFORD [*37*] führt LE GRAND auf die bei BEDFORDS Untersuchungen benutzte geringe *Leuchtdichte* des blauen Lichtes, ferner auf den chromatischen Fehler des Auges sowie auf Blendung durch die im Verhältnis zum Blau übermäßige weiße Umfeldbeleuchtung zurück. Wie in Kap. II. 2a angegeben, nimmt in der Tat die Sehschärfe, unabhängig von der Wellenlänge, beim Vermindern der Helligkeit des Gesichtsfeldes allgemein beträchtlich ab. Die Möglichkeit eines modifizierten Mixed Highs-Verfahrens bleibt trotzdem bestehen; denn für beliebige Farbwechsel ist das Auflösungsvermögen des Auges wirklich kaum halb so groß, wie für Helligkeitsunterschiede. Es genügt daher nach LE GRAND, in getrennten Kanälen mit bis zu 2 MHz Grenzfrequenz drei reine Farbauszüge, und im Grünkanal, der bis zu 4 MHz reicht, gleichzeitig das Gemisch der Intensitätsschwankungen aller drei Farbauszüge zu übertragen, wobei das Blaubild im Empfänger vom oberen Frequenzbande genau so mitgesteuert werden müßte, wie das Rot- und das Grünbild. Der praktische Befund beim unmodifizierten Mixed Highs-Verfahren ist, trotz der von LE GRAND gut begründeten Einwände, hinsichtlich der Blauschärfe durchaus befriedigend.

Die Ansicht von Y. LE GRAND ist in einer jüngst erschienenen Arbeit von M. W. BALDWIN jr. [*39*] durch rein optische Messungen bestätigt worden. BALDWIN arbeitete mit additiver Mischung von drei Grundfarben und fand, daß bei gleicher Leuchtdichte die Sehschärfe für Blau der für Rot und Grün nicht nachsteht. Im normalen „Weiß" ist aber der Intensitätsanteil des blauen Lichtes stets sehr klein, so daß natürliche Bilder, d. h. solche, die ein mit Tageslicht oder künstlichem weißen Licht beleuchtetes Feld von reflektierenden Gegenständen darstellen, selbst dort, wo eine Fläche ausschließlich im Blau, und zwar mit hohem Reflexionskoeffizienten, zurückstrahlt, doch nur eine relativ geringe Intensität aufweisen. Daraus erklärt sich, daß nach den Messungen von BALDWIN in dem additiven Dreifarbenbild die Defokussierung der grünen Komponente vom Auge eher wahrgenommen wird, als die von Rot und von Blau. Die Erkennungsschärfen verhalten sich bei der Defokussiermethode wie 3 : 1 für Grün : Rot und wie 5 : 1 für Grün : Blau. Das weiße, durch Aufeinanderprojizieren hergestellte Bild hatte bei 15 foot-lambert max. Leuchtdichte ein Intensitätsverhältnis der Komponenten G : R : B wie 80 : 15 : 5.

Mit diesen Feststellungen dürfte die Kritik der physiologischen Grundlagen des Mixed Highs-Systems, was die notwendige Höchstfrequenz im Blaukanal betrifft, in ihre Schranken verwiesen sein.

9d. Dynamische Fähigkeiten der Farbempfindung.

Untersuchungen mit dem Zeilenraster der BRAUNschen Röhre als periodisch erregter und abklingender Lichtquelle haben erwiesen, daß für eine gegebene Lichtfarbe und Rasterfrequenz f_f die kritische Leuchtdichte B_k bzw. die Flimmerschwelle als $\varphi(f_f)$ von dem zeitlichen Bruchteil t von $1/f_f$, den der Aufbau des Rasters tatsächlich in Anspruch nimmt, unabhängig bleiben. Voraussetzung dafür ist lediglich, daß das Nachleuchten des Schirmes kürzer ist als $1/f_f$. Diese Feststellung ist für Farbfernsehen nach dem „Field-Sequential"-Verfahren (alternierende Farbfilter) (s. S. 61) insofern von Bedeutung, als die Natur des Verfahrens Anregungsverhältnisse fordert, die der vorstehenden Abklingbedingung entsprechen. Beispielsweise werden in dem mit einfachem Zeilensprung arbeitenden CBS-System sämtliche Bildpunkte 24mal je Sekunde in ihren drei Farbkomponenten übertragen. Dies erfordert in der gleichen Zeit 144 Einzelfelder in Form von zyklisch wechselnd angefärbten Halbzeilenrastern (je 48 in Rot, Grün und Blau), und da des Zeilensprunges wegen je 2 Einzelfelder einen vollen Farbauszug liefern, setzt sich das CBS-Dreifarbenbild aus $3 \cdot 24 = 72$ Einfarbenbildern zusammen. Demgemäß ist bei einer vertikalen Ablenkung des Schreiblichtpunktes von der Frequenz $f_f = 144$ Hz der Farbzyklus $f_f/3$, und das einzelne Farbfeld wird in $^1/_3$ der Dauer des letzteren durchlaufen. Fassen wir einen bestimmten Bildpunkt ins Auge, so leuchtet dieser 72mal je Sekunde, und zwar abwechselnd rot, grün, blau auf; entscheidend ist jedoch bei dieser Betrachtung, daß infolge des Filterwechsels und der Visionspersistenz der Schirm als Ganzes seine Anfärbung in jeder der 3 Grundfarben $f_w = 48$mal je Sekunde erneuert. Es ist dann die Bedingung $t < 1/f_w$ gegeben. Sie muß es auch deswegen sein, weil das Nachleuchten des weißen Schirmes nicht merklich in die Periode der nächstfolgenden, veränderten Anfärbung hineinreichen darf, um nicht den Farbton zu verfälschen.

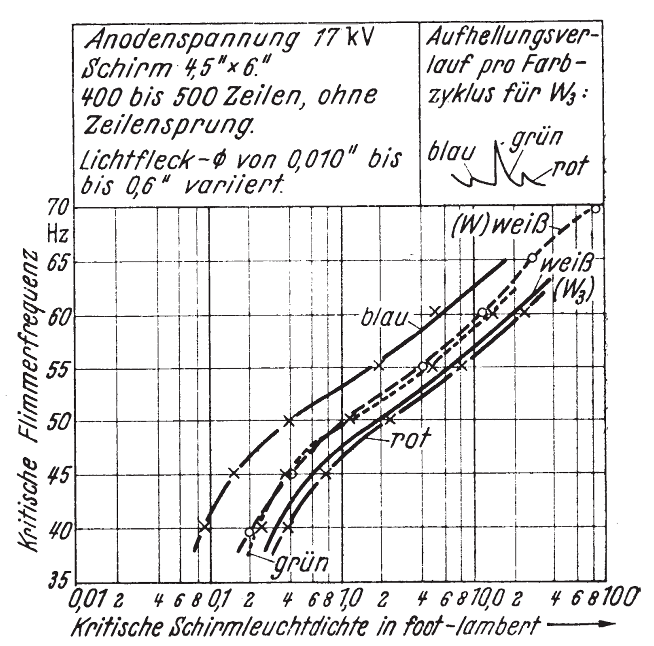


Abb. 25. Beziehung zwischen kritischer Flimmerfrequenz in Hz und Leuchtdichte mit der Farbe als Parameter nach O. H. SCHADE, II. [3], Teil II. Die Bezeichnungen W und W_3 betreffen weißleuchtende Schirmphosphore.

Auftreten eines monochromatischen Bildfeldes entspricht bei derartigen Systemen der Funktion einer Versuchsanordnung, mit der O. H. SCHADE [3, Part II] die allgemein für Sequential-Verfahren mit niederfrequentem Farbwechsel hinsichtlich der Abklingverhältnisse geltenden Forderungen untersucht hat. Beim Erzeugen von 60 leuchtenden Feldern/sek fand er B_k und f_k (krit. Flimmerfrequenz) konstant, unabhängig davon, ob die Dauer des Einzelfeldes gleich oder weniger als $^1/_{60}$ sek war. Zur Beobachtung dienten unmodulierte Zeilenraster BRAUNscher Röhren mit zusammengesetzten weißen Leuchtphosphoren; die Verschiedenheit der Nachleuchtzeitkonstanten der Komponenten blieb unberücksichtigt. Das Licht des Schirmes durchsetzte *Wratten*-Filter für Rot, Grün und Blau; zum Vergleich wurde die kritische Leuchtdichte auch bei ungefiltertem Weiß gemessen. Die in Abb. 25 oben skizzierte Kurve gibt den ungefähren

Leuchtdichteverlauf nach Passieren der Filter für einen vollen Farbzyklus wieder. Nach den in Abb. 25 zusammengestellten Kurven ist *Blau bei gleicher Leuchtdichte flimmeranfälliger* als Rot und Grün. Weiß liegt dazwischen. SCHADE folgert aus seinen Meßwerten, daß für unmodulierte Lichtverteilung ein Field-Sequential-Verfahren mit $f_w = 40$ Farbzyklen/sek (bei $\varrho = 4$) nur ganz unzureichende Leuchtdichten gestatten würde, nämlich $B_k \approx 0{,}2$ foot-lambert für farbige Flächen und $B_k \approx 0{,}32$ foot-lambert für Weiß. Um die normalen Werte, $B_k \approx 6$ foot-lambert (etwa 21 HK/m²) für Grün und $B_k \approx 9{,}6$ foot-lambert (etwa 33 HK/m²) für Weiß, anwenden zu können, müßte der Farbzyklus auf $f_w = 56$ sek, die Feldfrequenz also auf 168/sek erhöht werden. Daß das CBS-System mit seinen niedrigeren Wechselzahlen hinsichtlich des Flimmerns brauchbare Ergebnisse liefert, liegt nach diesen Feststellungen SCHADES offenbar an der geringen Leuchtdichte, die infolge der starken Absorption durch die Farbfilter und der gedrittelten Wirkzeit von der an sich hellen weißen Schirmemission übrigbleibt. SCHADE gibt dafür den auffallend kleinen Betrag von 4% an. Im Zusammenhang mit den Störerscheinungen (Farbrändern bei Bewegungen usw.), die vom Vorgang der Bildfeldzerlegung herrühren, sprechen diese physiologisch begründeten Daten klar zugunsten solcher Systeme, die, sei es durch gleichzeitige Übertragung aller drei Farbkomponenten, sei es durch einen mit Zeilenfrequenz („Line Sequential") oder Bildpunktfrequenz („Dot-Sequential") erfolgenden Farbzyklus, derart enge Grenzen der kritischen Leuchtdichte von vornherein praktisch ausschließen.

Die Untersuchungen von PORTER [*11a*] und anderen haben die Gültigkeit des auf S. 25 erörterten Gesetzes von TALBOT für alle Spektralfarben bestätigt. Unter dieser Voraussetzung gilt für die Leuchtdichte B eines „Field-Sequential"-Verfahrens von der Art des CBS-Systems (Indizes r = rot, g = grün, b = blau) folgende Gleichung [*40*]:

$$B = \frac{1}{T_z}\left(A_r\, Y_r \cdot \int_0^{T_r} N_r(t)\, dt + A_g\, Y_g \cdot \int_0^{T_g} N_g(t)\, dt + A_b\, Y_b \int_0^{T_b} N_b(t)\, dt\right), \quad \text{(II.25)}$$

worin bedeuten:

T_z die Periodendauer eines vollständigen Farbzyklus,

T_r, T_g, T_b die Periodendauern der einzelnen Farbfelder $\left(= \frac{T_z}{3}\right)$,

A_r, A_g, A_b die steuernden Signalamplituden während der zugeordneten Farbfelder, über die Dauer derselben als konstant angenommen.

Y_r, Y_g, Y_b die Leuchtdichten hinter den Filtern je Einheitsamplitude des steuernden elektrischen Signals; diese Werte sind mit den Y-Komponenten des Farbtripels im Normaldreieck identisch und nach Gl. (II.23) zu berechnen, falls die Energieverteilung im filtrierten Licht bekannt ist,

$N_r(t), N_g(t), N_b(t)$ die Abklingkurven der Komponenten des Mischphosphors.

Für die Übertragung von Weiß pflegt man die Amplituden A_r, A_g, A_b einander gleichzumachen. Würden dabei die spezifischen Leuchtdichten Y_r, Y_g, Y_b ebenfalls gleiche Werte annehmen, so wäre dies, vom Standpunkt der Flimmerfreiheit aus betrachtet, sehr günstig, weil dann die Periodizität der 144 Einzelfelder/sek des CBS-Verfahrens wirksam sein würde. Für naturgetreue Farbwiedergabe verbietet sich jedoch die Bedingung gleicher Y. Der Grünanteil überwiegt beträchtlich den Rotanteil und dieser wiederum den Blauanteil. Daraus folgt, daß infolge der Helligkeitsschwankung im Verlauf des Farbzyklus *dessen* Frequenz, insbesondere für die Mischfarbe Weiß, die Grenze der kritischen Leuchtdichte erheblich mitbestimmt.

Da Grün im Farbgemisch die größte Helligkeit besitzt, kann nach dem Voraufgehenden das Verhältnis der weißen Mischleuchtdichte B_W zur Leuchtdichte hinter dem Grünfilter B_G als Kriterium der Flimmerfreiheit dienen. Unter Annahme gleicher $N(t)$ für die Bestandteile des Leuchtphosphors wird dann (bei gleichen Signalamplituden) nach Gl. (II.25) (T beliebig):

$$B_W = \frac{Y_r + Y_g + Y_b}{T_z} \cdot \int_0^T N(t)\, dt \qquad \text{(II.26)}$$

und für ein reines Grünbild:

$$B_G = \frac{Y_g}{T_z} \int_0^T N(t)\, dt. \qquad \text{(II.27)}$$

Daher:

$$\frac{B_W}{B_G} = \frac{Y_r + Y_g + Y_b}{Y_g}. \qquad \text{(II.28)}$$

Nun ist Y_b im Verhältnis zu Y_g stets die schwächste Komponente, und der Unterschied dieser beiden Werte wird daher maßgebend sein für den Grad der Annäherung an die Flimmergrenze; d. h. mit wachsender Mischleuchtdichte wird Flimmern im Zyklus um so leichter auftreten, je stärker die Leuchtdichten im Grünauszug und im Blauauszug voneinander differieren. Diese Annahme bedeutet eben nichts anderes, als daß Grün im Weiß in zunehmendem Prozentsatz enthalten ist, so daß B_W/B_G kleiner wird. Um große Leuchtdichten flimmerfrei herzustellen, muß man anstreben, den Anteil Y_g des Gemisches $Y_r + Y_g + Y_b$ möglichst gering zu machen. Dem steht einschränkend entgegen, daß jedes hochwertige Weiß (Tageslicht, Sonnenlicht) besonders reich an grünen Strahlen ist.

Bezüglich der Abklingfunktionen $N(t)$ gibt GOLDMARK an, daß bei seinem Field-Sequential-System (CBS) das Nachleuchten während der Dauer des einzelnen Farbfeldes auf $^1/_{20}$ des Anfangswertes hinuntergehen soll, wenn man Übersprechen von einem Farbauszug in den nächsten, d. h. Fälschung des zu übertragenden Farbtones, vermeiden will.

Analog zum Falle des Schwarz-Weiß-Bildes ist auch beim farbigen Bilde die kritische Flimmerfrequenz eine Funktion des Verhältnisses ϱ = Betrachtungsabstand : Bildhöhe. Mit wachsendem ϱ nimmt B_K bei gleichbleibender Rasterfrequenz zu und bei gleichbleibendem B die kritische Frequenz, oberhalb deren das Flimmern verschwindet, ab. Aus demselben Grunde gilt, daß Flächen einheitlicher Farbe, insbesondere im Grün, weil dieses die größte Leuchtdichte aufweist, um so eher den Eindruck der Unstetigkeit ihrer Aufhellung (typischen Flackerns) erwecken, je größer der Gesichtswinkel ist, den sie mit dem Auge bilden. Als psychologisches Gegengewicht sei angeführt, daß die Auffälligkeit derartiger Störungen in hohem Maße durch die seelische Beanspruchung wettgemacht werden kann, die der Bildinhalt beim Betrachter hervorruft.

In das Gebiet der Psychologie gehört auch die Erklärung des plastischen Eindrucks, den das farbige Fernsehbild im Verhältnis zur Schwarz-Weiß-Wiedergabe bei gleicher Bildpunktzahl in bemerkenswertem Grade erweckt.

Die Übertragung der natürlichen Farbtöne kann Mängel der objektiven Auflösung dadurch kompensieren, daß sie der Deutung des auf dem Bildschirm Gesehenen ein zusätzliches Kriterium liefert. Die früher gezogene Folgerung, daß eine kleinere Anzahl von bunten Flächenelementen pro cm² den gleichen Grad von Erkennbarkeit hervorbringen könne, wie eine größere Anzahl von monochromatischen helleren und dunkleren Flächenelementen, scheint sich freilich nicht bestätigt zu haben. Allerdings dürften noch vorhandene dynamische Störungen des Bildaufbaus (verstärktes Rauschen im Farbbilde, „crawl"-Effekt beim

Dot-Interlaced-Verfahren u. a.) die endgültige Entscheidung dieser Frage einstweilen ausschließen. Sicher aber ist, daß bei *gleicher* Bildpunktzahl die Farbe sehr viel zur visuellen Ertüchtigung des Betrachters beiträgt. Sie hilft einesteils, an Hand unserer Erfahrung die Objekte rascher und deutlicher zu identifizieren, andernteils erleichtert sie in beträchtlichem Maße die Lokalisierung der erkannten Einzelheiten in der Tiefe des Raumes und fördert so den plastischen Eindruck des übertragenen Gesichtsfeldes. Dies ist in solchem Maße der Fall, daß die Hinzunahme der stereoskopischen Wiedergabe auf absehbare Zeit entbehrlich sein dürfte[1].

10. Folgerungen für die Technik des Farbfernsehens.

Das mit Farbfilterzyklus arbeitende „Sequential"-System (CBS) weist, wie sich aus dem voraufgehenden Abschnitt ergibt, eine Reihe physiologisch-optischer Nachteile im Vergleich zum „Simultaneous"-System auf: Flimmerneigung größerer, einheitlich weißer oder grünlicher Bezirke im Bildfelde, Lichtverluste und Begrenzung der zulässigen Leuchtdichte, Gefahr des „Übersprechens" einer Farbkomponente auf die beiden anderen Farbauszüge.

Des weiteren besteht die Möglichkeit der Bildung von störenden bunten Säumen oder Fransen an den Rändern rasch bewegter Objekte. Sie tritt auf, sobald das Auge die Verschiebung von einem Zeilenfeld zum nächsten räumlich und zeitlich aufzulösen vermag, weil ja inzwischen die Anfärbung des Bildschirmes ein- oder mehrmals gewechselt hat. (Beispiel: fliegender Tennisball, der nacheinander rot, grün und blau erscheint.) Erfolgt freilich dieser Wechsel so schnell, daß bis zur okularen Adaptation auf den bewegten Gegenstand dessen sämtliche Farbauszüge durchlaufen worden sind, so wird die Aufspaltung in die verschiedenen Komponenten infolge Mischung im Auge nicht wahrgenommen; ein weißes Objekt bleibt durchweg weiß, ein farbiges in seiner richtigen Färbung. Unter Voraussetzung einer für diesen Mischvorgang genügenden Frequenz des Filterzyklus hat GOLDMARK [*40*] dargelegt, daß ein Gegenstand, der sich innerhalb der Dauer des Einzelfeldes um nicht mehr als die Hälfte seiner in der Bewegungsrichtung gemessenen Länge verschiebt, keine Farbsäume zeigen kann. Die quantitative Auswertung dieser Erkenntnis führt zu der Schlußfolgerung, daß die bunten Fransen („colour fringes") keine störend häufige Erscheinung sein können. Aber dies gilt nur für eine Feldfrequenz von 144 Hz, die also weit oberhalb der normalen von 60 Hz liegt!

Sonach besteht keine Möglichkeit, das CBS-System in seiner grundsätzlichen Form „compatibel" zu machen. Der Gedanke der „compatibility" ist nämlich folgender: Die Methode der Farbübertragung soll derart sein, daß sie den vorhandenen Empfängern für schwarz-weiße Bilder ohne weiteres gestattet, diese aus der gleichen Sendung mit unverminderter Qualität aufzunehmen. Die Sendung muß zu diesem Zwecke die Farbkomponenten in einer Form enthalten, auf die nur der Farbempfänger anspricht, während der Schwarz-Weiß-Empfänger davon überhaupt nicht beeinflußt wird. Weitere Forderungen sind, daß der Farbempfänger imstande sein muß, unfarbige Bilder ebenso gut wie der Schwarz-

[1] Die Gesetze des stereoskopischen Bildaufbaus gelten im Falle des Fernsehens unverändert so, wie bei ihrer Anwendung im gewöhnlichen Stereoskop oder für den plastischen Film, und bieten insofern an dieser Stelle keinen Anlaß zu eingehender Behandlung (s. die Physikbücher). Solange die Durchführung des stereoskopischen Fernsehens eine besondere Bewaffnung des Auges (Polarisationsbrille u. dgl.) voraussetzt, erscheinen seine wirtschaftlichen Aussichten fraglich. Eine davon freie Zukunftslösung würde diese Sachlage schlagartig verändern.

Weiß-Empfänger wiederzugeben, und daß das für USA genormte Frequenzband von 6 MHz für den Bild-Ton-Kanal nicht überschritten wird.

Natürlich muß ein solches Übertragungssystem die für die Schwarz-Weiß-Sendung festgelegte Zeilen- und Bildfrequenz bzw. Feldfrequenz beibehalten. Aus diesem Grunde konnte das CBS-Verfahren nicht zur Einführung kommen; denn es ließe sich mit 60 Feldern/sek nicht ohne stark störendes Farbflimmern und Auftreten von Farbfransen verwirklichen. Überdies sprach gegen die Einführung sein nicht rein elektronischer Charakter, d. h. die Verwendung motorisch angetriebener Massen in Gestalt der rotierenden Farbfilter.

Das „Simultaneous"-System hingegen enthält weder mechanisch bewegte Elemente (von den handbedienten Schalt- und Abstimmelementen selbstverständlich abgesehen), noch fehlt ihm die „compatibility". Wie diese erreicht wird — Methode des doppelt modulierten Hilfsträgers, der in das Frequenzspektrum passend eingefaltet ist — werden wir im Kap. V. 4a und im 2. Teilband sehen. Hier wollen wir darauf nur insoweit eingehen, wie die Grundlagen der Farbempfindung und der Kolorimetrie dabei zu berücksichtigen sind. Was ist also nötig, um sämtliche Bestandteile jeder beliebigen natürlichen Farbe gleichzeitig mit geringstem elektrischen Aufwand und kleinstmöglicher Frequenzbandbreite zu übertragen?

Wir denken uns im Weißpunkt des Farbdreiecks auf dessen Ebene ein Lot errichtet, um dessen Fußpunkt ein von ihm ausgehender Vektor kreist. Dann stellt die Höhe des Lotes die Helligkeit („luminance") des abgetasteten Bildpunktes dar. Die Richtung des Vektors zeigt den Farbton, seine Länge den Sättigungsgrad desselben, beides zusammen die Farbigkeit des Bildpunktes („chrominance") an. Damit sind sämtliche Bestimmungsstücke der zu übertragenden Farbe gegeben. Wir können die Helligkeit mittels des Stromes messen, den eine Photozelle abgibt, wenn sie — an sich oder infolge passender spektraler Filterung — einen Gang der Empfindlichkeit besitzt, der der Augenempfindlichkeit (Abb. 3) angeglichen ist. Modulieren wir mit einer diesem Photostrom proportionalen Spannung den normalen Bildträger, so erhält der Empfänger ein Signal, das die Helligkeitswerte der einzelnen Bildpunkte in dem gleichen Verhältnis überträgt, wie sie im Original dem Auge erscheinen. Dieses Signal allein genügt für eine intensitätsgetreue Wiedergabe im Schwarz-Weiß-Gerät, erfüllt also die Anforderungen der „compatibility".

Für die Übermittlung der Chrominanz zum Farbfernsehempfänger benötigen wir den erwähnten Hilfsträger. Der Kunstgriff des NTSC-Verfahrens („National Television Standards Comittee") besteht in der doppelten Ausnutzung dieses Hilfsträgers. Seine Amplitude drückt den Sättigungsgrad („saturation") des betrachteten farbigen Flächenelements, seine Phase (Winkellage) den spektralen Farbton („hue") aus. Wichtig ist die Tatsache, daß wir auf diese Weise nur die Rot- und die Blaukomponente zu übertragen brauchen. Die Grünkomponente wird lediglich als Bestandteil der Luminanz, und zwar mit der vollen von der Kamera gelieferten Frequenzbandbreite ausgesandt; sie wirkt also auch anteilig im Schwarz-Weiß-Empfänger mit und gewährleistet diesem so die unverminderte Bildschärfe. Für die Rot- und besonders die Blaukomponente bedarf es aber nach den Ausführungen in Kap. II. 9c in Anbetracht des geringeren okularen Auflösungsvermögens für diese Farben keines so ausgedehnten Frequenzbandes, wie für den Weißgehalt des Bildes. Diese entscheidende, zum erstenmal bei dem „Mixed-Highs"-Verfahren benutzte Tatsache macht die Methode des Hilfsträgers technisch anwendbar; denn es ist nun nicht mehr nötig, breite Seitenbänder desselben zu übertragen. Der begrenzteren Sehschärfe in Blau und Rot ist vollkommen genügt, wenn für die Blaukomponente ein Band von etwa 0,5 MHz, für die Rot-

komponente ein solches von etwa 1,5 MHz durchgelassen wird. Hinsichtlich der Grenzen der Hilfsträger-Methode vgl. Kap. V. 4a, Schlußabsatz.

Qualitative und quantitative Angaben über die amplitudenrichtige Zusammensetzung der Farbsendung und die Farbdifferenz-Methode, die Frequenzlage und Modulation des Hilfsträgers, die Synchronisierung des Empfangsdetektors, die Rückgewinnung der drei Farbauszüge und die Steuerung des Dreifarben-Kineskops (Kap. X) bringt Bd. V, Teil 2 dieses Werkes.

Schrifttum zum Kap. II.

[*1*] Gehlhoff, G.: Lehrbuch der Technischen Physik. Bd. II (1926) § 613.

[*2*] Schneider, L.: Der Einfluß der Beleuchtung auf die Leistungsfähigkeit des Menschen. Licht u. Lampe Bd. 16 (1927) S. 803—806 u. 842—846. Abgedruckt in: Techn.-wiss. Abh. Osram Bd. I (1930) S. 25—41. Berlin: Springer.

[*3*] Schade, O. H.: Electro-Optical Characteristics of Television Systems. (Vierteilige Arbeit) RCA-Review Bd. IX (1948) S. 7—34 (Part I); 246—282 (Part II); 491—527 (Part III); 653—686 (Part IV).

[*4*] Goldmark, P. C.: Brightness and Contrast in Television. J. Brit. Inst. Radio Eng. Bd. 10 (1950) S. 219—225.

[*5*] Gehlhoff, G.: Lehrbuch der Technischen Physik. Bd. II (1926) § 613, Tab. 70.

[*6*] Lehmann, H.: Grundlagen der Kinematographie. Leipzig: B. G. Teubner 1910.

[*7*] Ives, H. E., u. E. F. Kingsbury: The Theory of the Flicker Photometer. Phil. Mag. (Ser. 6) Bd. 28 (1914) S. 708—728. Desgl. II, Unsymmetrical Conditions. Phil. Mag. (Ser. 6) Bd. 31 (1916) S. 290—321.

[*8*] Knoll, M., u. R. Theile: Kathodenstrahlröhren. Fortschritte der Hochfrequenztechnik Bd. 1 (1941) S. 530.

[*9*] Schröter, F.: Die Bedeutung des Bildausgleichsprojektors als Fernsehgeber. Schweizer Arch. angew. Wiss. Techn., Sonderheft über die 1. internationale Fernsehtagung in Zürich 1938.

[*10*] —: Bildspeicherung im Fernsehempfang. Optik Bd. 1 (1946) S. 406—409.
—: Bildspeicherprobleme. Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. Bd. 40 (1949) S. 564 bis 566.
—: Französ. Patentschrift Telefunken, Nr. 825833 vom 16. 12. 1937; deutsche Priorität vom 29. 8. 1936.
—: Speicherempfang und Differenzbild im Fernsehen. A. E. Ü. Bd. 7 (1953) S. 63—70.

[*11*] Ferry, E. S.: Persistence of Vision. Amer. J. Sci. (Ser. 3), Bd. 44 (1892) S. 192—207.

[*11a*] Porter, T. C.: Study of Flicker. Proc. Roy. Soc., Lond. Bd. 70 (1902) S. 313—329.

[*12*] Marbe, K.: Theorie der kinematographischen Projektionen. Leipzig: J. A. Barth 1910.

[*13*] Ives, H. E.: Studies in the Photometry of Lights of Different Colours. II. Spectral Luminosity Curves by the Method of Critical Frequency. Phil. Mag. (Ser. 6) Bd. 24 (1912) S. 352—370 und 5 Fortsetzungen im gleichen Bande.

[*14*] Schade, O. H.: [*3*], 1. Teil, S. 22, Fig. 6; 2. Teil, S. 273, Fig. 39.

[*15*] Haantjes, J., u. F. W. de Vrijer: Flicker in Television Pictures. Wireless Engr. Bd. 28 (1951) S. 40—42.

[*16*] Hertwig, H.: Die optisch zu erfüllenden Voraussetzungen zur Erzielung einwandfreier Fernsehbilder. Funk u. Ton Bd. 3 (1949) S. 575—583.

[*17*] Weiss, G.: Zur Frage der deutschen Fernseh-Rundfunknormung. Fernsehen Bd. 8 (1937) S. 45—47.

[*18*] Engström, E. W.: A Study of Television Image Characteristics, Part II, Determination of Frame Frequency for Television in Terms of Flicker Characteristics. Proc. Inst. Radio Engrs., N. Y. Bd. 23 (1935) S. 295—310.

[*19*] Schröter, F.: Bericht an Telefunken, notariell hinterlegt zwecks späterer Patentanmeldung am 12. 3. 1946.

[*19a*] Toulon, P. M. G.: Le Balayage Cavalier. Onde Électr. Bd. 28 (1948) S. 412 —416.

[*20*] Schneider, L.: Techn.-wiss. Abh. Osram Bd. I (1930) S. 25, s. [*2*].

[*21*] Hertwig, H.: [*16*], S. 579.

[22] BLACKWELL, H. R.: Contrast Thresholds of the Human Eye. J. opt. Soc. Amer. Bd. 36 (1946) S. 624.

[23] ARENDT, P. R.: Über die Bedeutung der Adaptation des Auges für die Fernsehübertragung. F. T. Z. Bd. 5 (1952) S. 411.

[24] SCHRÖTER, F.: Entwicklung, Stand und Grenzen der Fernsehübertragung. Telefunkenztg. Bd. 18, Nr. 79 (1938) S. 23–25, besonders 33.

[25] ARENDT, P. R.: Die „empfindungsrichtige" Gamma-Korrektur von Fernsehbildern. A. E. Ü. Bd. 8 (1954) S. 1–4.

[26] HANES, R. M.: A Scale of subjective Brightness. J. exp. Psych. Bd. 39 (1949) S. 438. The Construction of subjective Brightness Scales from Fractionation Data, a Validation; ebenda Bd. 39 (1949) S. 719.

[27] TOWNSEND, C. L., u. E. D. GOODALE: The Orthogam Amplifier. RCA-Review Bd. XI (1950) S. 399–410.

[28] SCHADE, O. H.: [3], 1. Teil, S. 24–27.

[29] BALDWIN jr., M. W.: The Subjective Sharpness of Simulated Television Images. Bell Syst. techn. J. Bd. 19 (1940) S. 563–587.

[30] COBB, P. W., u. F. K. MOSS: The four Variables of the Visual Threshold. J. Franklin Inst. Bd. 205 (1928) S. 831–847.

[31] ENGSTRÖM, E. W.: A Study of Television Image Characteristics. Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y. Bd. 21 (1933) S. 1631–1651.

[32] MERTZ, P., A. D. FOWLER u. H. N. CHRISTOPHER: Quality Rating of Television Images. Bell Labor. Rep. 1949.

[33] JESTY, L. C., u. N. R. PHELP: The Evaluation of Picture Quality with special Reference to Television Systems, Part I. Marconi Rev. Bd. XV, Nr. 102 (1951) S. 1–24.

[34] ROSEMANN, J.: Farbmessungen zur Prüfung des SCHRÖDINGERschen Linienelements der höheren Farbmetrik. Ann. Phys., Lpz. Bd. 32 (1938) S. 640.

[35] GUILD, J.: The Colorimetric Properties of the Spectrum. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Bd. 230 (1931) S. 149.

[36] WRIGHT, W. D.: A Re-Determination of the trichromatic Coefficients of the spectral Colours. Trans. opt. Soc., Lond. Bd. 30 (1928/29) S. 141; A Re-Determination of the Mixture Curves of the Spectrum. Trans. opt. Soc., Lond. Bd. 31 (1929/30) S. 201.

[37] BEDFORD, A. V.: Mixed Highs in Simultaneous Color Television. Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y. Bd. 38 (1950) S. 1003; abgedruckt im Bericht der RCA-Laboratories Division, Juli 1950.

[38] LE GRAND, Y.: A propos des bases physiologiques de la télévision en couleurs. Onde électr. Bd. XXXI (1951) S. 173.

[39] BALDWIN jr., M. W.: Subjective Sharpness of additive Color Pictures. Proc. Inst. Radio Engrs. N. Y. Bd. 39 (1951) S. 1173–1176.

[40] GOLDMARK, P. C.: Flicker and Colour Fringing Phenomena in Colour Television. J. Brit. Inst. Radio Engr. Bd. 10 (1950) S. 208.